

Санкт-Петербургский государственный университет

АРХИПОВ Данил Эдуардович

Выпускная квалификационная работа

Динамика перигляциальных озёр Юго-Восточного Алтая

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *СВ.5021. «Гидрометеорология»*

Профиль *«Гидрология суши»*

Научный руководитель: доцент с возложенными обязанностями
заведующей кафедрой гидрологии суши,
к. г. н., доцент, ПРЯХИНА Галина Валентиновна

Рецензент:
ФГБОУ ВО АГУ
к. г. н., доцент, ОСТАНИН Олег Васильевич

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение	3
ГЛАВА 1. ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ПРОРЫВОВ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОЗЕР	6
1.1 Динамические причины прорывов в перигляциальных озерах.....	7
1.2 Долгосрочные причины провалов в перигляциальных озерах	10
ГЛАВА 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	13
ГЛАВА 3. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ	17
3.1 Монгун-Тайга	17
3.1.1 Климат	18
3.1.2 Современное оледенение	19
3.2 Таван-Богдо-Ола	21
3.2.1 Климат	23
3.2.2 Современное оледенение	24
ГЛАВА 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	26
4.1 Выделение перигляциальных озёр с использованием космических снимков	28
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПЕРИОД.....	30
5.1 Зависимость количества и суммарных площадей озёр от площадей ледников.....	38
5.2 Распределение количества озёр к морфологическому типу ледников	41
5.3 Высотное распределение перигляциальных озёр	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	54

Введение

Изменение климата является одним из наиболее значимых вызовов, с которыми сталкивается наша планета в настоящее время. Оно оказывает сильное влияние на различные компоненты природной среды, включая ледники и перигляциальные озёра. Ледники играют важную роль в гидросфере, обеспечивая регуляцию стока воды и поддержание баланса водных ресурсов. Однако, под воздействием климатических изменений, ледники сталкиваются с интенсивным таянием и сокращением своих размеров.

В результате этих изменений, приледниковые озёра, которые получают основное питание от сброса ледниковых вод, также подвержены существенным трансформациям. Изменение климата влияет на температуру воздуха и количественные показатели осадков, что в свою очередь оказывает влияние на сток ледниковых вод и питание перигляциальных озёр. Этот процесс приводит к изменению их геоморфологической структуры, гидрологического режима, объёмов половодья и экосистемных характеристик.

В свете этих фактов, исследование изменчивости перигляциальных озёр является важной задачей, позволяющей лучше понять механизмы и последствия таких изменений. Такое исследование позволит прогнозировать будущие изменения в системе ледников-озёра и разрабатывать соответствующие стратегии управления водными ресурсами. В дипломной работе рассматривается влияние сокращения площадей оледенения на приледниковые озёра и проводится анализ их изменений на территории горных массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола. В качестве динамики перигляциальных озёр в этой работе понимается временная изменчивость площадей исследуемых озёр, а также изменения в пространственном распределении озёр, в первую очередь по высотным диапазонам.

Актуальность данной работы обусловлена несколькими факторами. Во-первых, деградация оледенения является глобальной проблемой, которая имеет серьезное воздействие на окружающую среду. Понимание механизмов влияния уменьшения площадей ледников на перигляциальные озёра позволяет

расширить наши знания об изменяющейся гидросфере и прогнозировать будущие изменения.

Во-вторых, приледниковые озёра играют важную роль в гидрологическом режиме рек, расположенных ниже по течению. Их изменение под воздействием деградации оледенения может привести к нарушению баланса водных ресурсов.

В-третьих, изучение причин природных катаклизмов, таких как прорывы перигляциальных озёр, провоцирующих схождение селевых потоков, помогает при разработке новых методик прогнозирования и предотвращения этих опасных явлений.

Кроме того, исследования приледниковых озёр могут быть полезными для разработки стратегий управления водными ресурсами. Результаты таких исследований помогут определить оптимальные подходы к сохранению и устойчивому использованию озёрных экосистем, а также прогнозировать возможные последствия изменения климата для общественных и экономических сфер.

Таким образом, исследование влияния климатических изменений на перигляциальные озёра имеет практическую значимость для оценки экологического состояния данных экосистем, разработки мер по их сохранению и адаптации к изменяющимся условиям, а также для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами в контексте изменения климата.

Основной целью работы является оценка особенностей временной изменчивости морфометрических характеристик и пространственного распределения перигляциальных озёр в условиях деградации оледенения Юго-Восточного Алтая в пределах горных массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола.

Основными задачами данной работы стали:

1. Изучение теоретико-методологических основ исследования;
2. Обзор литературы, затрагивающий тему работы;

3. Выявление временной изменчивости морфометрических характеристик перигляциальных озёр массива Монгун-Тайга и массива Таван-Богдо-Ола;

4. Оценка современного состояния перигляциальных озёр и выявление особенностей временной изменчивости морфометрических характеристик в условиях деградации оледенения исследуемой территории;

Объекты исследования: перигляциальные озёра на территории массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола.

Предмет исследования: временная изменчивость морфометрических характеристик перигляциальных озёр.

ГЛАВА 1. ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ПРОРЫВОВ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОЗЕР

Под термином «перигляциальное озеро» (periglacial lake) понимается озеро, относящиеся к области, прилегающей к леднику или ледниковому покрову, котловина которого имеет моренное происхождение, а питается озеро преимущественно талыми водами, вытекающих с ледника в период абляции [12]. Этот тип озера считается не стабильным, поскольку плотина сложена из моренного материала, который как правило, не уплотнен, а значит может произойти наводнение, вызванное прорывом перигляциального озера [46]. Приледниковые озера представляют большую опасность из-за угрозы формирования прорывных паводков и селей [12].

Многие перигляциальные озера проходят трансгрессивную стадию развития, во время которой, формируется котловина озера и заполняется талыми ледниковыми водами. После этого водоем классифицируется как моренно-подпрудный. Определяющим фактором дальнейшего развития озера является количество поступающего ледникового стока. В результате следующей, регрессивной стадии, происходит прорыв подпруживающей морены, который приводит к частичному сбросу воды из озера [23].

Наводнения, вызванные прорывами перигляциальных озер (GLOFS), представляют серьезную угрозу для жителей высокогорных районов по всему миру и являются одними из наиболее разрушительных стихийных бедствий в высокогорье. Расходы воды, формирующие наводнение могут во много раз превышать расходы половодья [43;46]. Проблема наиболее актуальна в современный этап деградации ледников, поскольку из-за глобального потепления нарушается стабильный режим озер, моренных массивов и ледников [30]. Следствием деградации ледников является появление большого количества приледниковых озер и их наполнение талыми ледниковыми водами. В результате прорыва ледникового озера образуются селевые потоки и прорывные паводки, способные уничтожить инфраструктуру, нанести серьезный материальный ущерб, а в некоторых случаях и унести человеческие жизни [31].

Основные причины прорыва перигляциальных озер разделяют на две группы: динамические – вызванные относительно краткосрочным событием, являющимся инициатором прорыва и долгосрочные – оказывающие продолжительное влияние и не имеющие динамической причины разрушения плотины.

1.1 Динамические причины прорывов в перигляциальных озерах

К динамическим причинам прорыва озера относятся пять основных причин:

1. Обвалы в озеро (ледопады, лавины, камнепады, оползни и селевые потоки)
2. Землетрясения
3. Поступление воды из озера, расположенного выше по течению
4. Блокирование подземных каналов оттока
5. Интенсивные осадки или снеготаяние

Отличительной чертой этой группы является временной интервал между инициирующим событием и разрушением моренной плотины. Время может варьироваться от нескольких минут, например при сходе лавины или селевого паводка из озера, расположенного выше по течению, до нескольких дней в случае переполнения чаши озера с последующим разрушением плотины при интенсивных осадках или снеготаянии. Эти динамические причины О'Коннор и др. (2001) назвали “квазислучайными” (“quasicoincidental”), поскольку невозможно точно предсказать время или место, в котором они произойдут.

Обвалы в озеро включает в себя различные виды массового движения, такие как ледопады, лавины, камнепады, оползни и селевые потоки. В результате этих катастрофических явлений, вода в озере вытесняется в виде волны высокой амплитуды, вызывающей быструю эрозию способную ослабить или вовсе разрушить моренную плотину [59]. В этом случае разрушение плотины разделяют на два различных механизма. В первом случае, является наиболее катастрофическим сценарием, происходит немедленный разрыв плотины в результате удара волны о плотину. Во втором случае разрушение происходит из-

за увеличения уровня воды в озере и как следствие повышение давления и расхода в фильтрационном канале. Из-за увеличенного расхода происходит расширение канала оттока [62]. Так продолжается до тех пор, пока канал оттока либо не сможет противостоять расширению, либо пока уровень воды не вернется на прежний уровень [43]. Существует и другой исход – в случае, когда моренная плотина достаточно устойчива, вода может переливаться через край. В таком случае плотина может не разрушиться [54] [46]. Таким образом, выброс воды из прорванной моренной плотины будет сильно зависеть от размера, формы и места схода лавины, высоты и скорости создаваемой волны [37].

Землетрясение способно оказывать сильное влияние на моренную плотину. Если сейсмическая волна достаточно сильная, то плотина может быть разрушена непосредственно воздействием на моренную плотину. В другом случае землетрясение может спровоцировать внутреннюю эрозию в плотине, в результате которой создаются большее количество фильтрационных каналов, что может привести к выбросу воды из озера путем прорыва плотины [55]. Однако, из-за внутренней эрозии может сложиться противоположная ситуация, когда подземные каналы оттока будут заблокированы. При отсутствии поверхностного стока из озера, уровень воды будет непрерывно повышаться. Сейсмическая активность может быть инициатором обвалов в озеро, что также может привести к прорыву озера. В некоторых случаях не удастся установить была плотина разрушена в следствии непосредственно землетрясения или же из-за обвалов в озеро [61].

В результате поступления воды из озера, расположенного выше по течению, плотина на озере, расположенном ниже по течению, может быть разрушена. Причиной может быть как значительное повышение уровня воды, так и прямое воздействие созданной волной смещения, имеющей высокий эрозионный и транспортный потенциал [41; 40]. В таком случае последствия будут те же, что и при движении по склону в озеро. Как правило общий объем паводка в этих случаях бывает значительным, поскольку в него поступают воды из двух озер.

Блокирование подземных каналов приводит к постоянно повышающемуся уровню воды в озере, вследствие чего происходит разрыв плотины, вызванный тем, что литостатическое давление превышает гидростатическое давление [59]. Часто блокирование подземных каналов оттока приводит к повышению уровня воды до тех пор, пока бассейн озера не заполнится и гидростатическое давление не превысит литостатическое давление.

Блокирование подземных каналов оттока может быть вызвано четырьмя механизмами:

1. Засорение отложениями, занесенными в озеро его притоками;
2. Засорение материалом, занесенным в озеро во время обвалов;
3. Замерзание каналов оттока (О'Коннор и др. 2001);
4. Блокирование каналов оттока, вызванное изменением внутренней структуры плотины из-за землетрясения (Liboutry и др. 1977).

Механизм разрушения плотины при интенсивных осадках или снеготаяния такой же, как и при блокировании подземных каналов. Наиболее распространенные причины: изменчивость и экстремальность осадков или изменчивость и экстремальность температуры воздуха по отношению к таянию снега [62]. Если озеро имеет поверхностный сток повышение уровня воды может привести к усилению эрозии каналов оттока. Если озеро не имеет поверхностного стока, то наиболее важным фактором является вертикальная высота между уровнем озера и самой низкой точкой на гребне плотины.

Повышение уровня воды в озере может привести к двум различным механизмам разрушения плотины. Первый механизм — это разрыв плотины из-за повышенного гидростатического давления. Это происходит, когда гидростатическое давление преодолевает литостатическое давление, которое удерживает компоненты плотины вместе [59]. Второй механизм - переполнение плотины, из-за которого последующая эрозия может привести к разрушению плотины [53]. Также хорошо известно, что интенсивные осадки также являются основной причиной обвалов в озеро, которое может привести к разрушению моренной плотины.

1.2 Долгосрочные причины прорывов в перигляциальных озерах

К долгосрочным причинам прорыва озера относятся три основных причины [38; 62]:

1. Таяние погребенного льда
2. Воздействие гидростатического давления
3. Влияние времени

Эти причины объединяет отсутствие начального внешнего динамического события [38; 62]. Из-за этого, как правило, трудно установить конечную причину разрушения плотины. Такие факторы, как воздействие гидростатического давления и влияние времени, несомненно, оказывают влияние на моренную плотину, но они редко бывают основной причиной разрушения. В основном воздействие долгосрочных причин приводит к ослаблению устойчивости плотины к динамическим причинам.

Ледяную линзу, встроенную в тело моренной плотины, называют «погребенный лед». Такая линза может составлять до 90% объема плотины [45]. В результате таяния линзы нарушается структурная целостность плотины, в результате чего теряется ее устойчивость [50; 60]. В результате снижается способность противостоять другим причинам, которые ранее не представляли угрозу прорыва или в крайнем случае, к разрыву под действием гидростатического давления. Например, в результате долгосрочной деградации моренной плотины уменьшается ее вертикальная высота между уровнем озера и самой низкой точкой на гребне плотины, что в сочетании с другими факторами, такими как умеренные осадки или таяние снега, может привести к разрушению плотины.

Гидростатическое давление — это давление, создаваемое гравитационной силой, действующей на толщу воды на определенной глубине. Вода в моренном озере, воздействует на плотину этим давлением, и ее долгосрочное воздействие может привести к разрушению плотины [62]. Чем больше ослаблена моренная плотина, например из-за таяния погребенного льда, тем проще она разрушится под действием гидростатического давления.

В случае, если гидростатическое давление превышает литостатическое давление, то плотина больше не в состоянии противостоять гидростатическому давлению, в таком случае плотина разрушается и его причиной является систематическое воздействие гидростатического давления [59]. Причиной этого может являться длительная деградация моренной плотины или повышение уровня воды в озере [51; 62]. Причиной повышения уровня воды может быть любой фактор, например интенсивные осадки, таяние снега или блокирование подземных каналов оттока [45; 47; 52]. Чем больше глубина, тем больше гидростатическое давление, поэтому глубокие озера более восприимчивы к разрыву, вызванному гидростатическим давлением.

Прорыв плотины не всегда сопровождается сильным изменением гидростатического давления, например при разрушении плотины в результате интенсивной эрозии склонов, таяния погребенного льда или изменений во внутренней структуре плотины разрыв происходит под действием гидростатического давления, но без его значительного изменения [59]. Все эти случаи представляют собой примеры «саморазрушения плотины», которые могут произойти без динамического события.

Влияние времени, несомненно, оказывает большой эффект на процесс разрушения моренной плотины. Плотина постоянно подвергается различным внешним воздействиям, которые приводят к ее постепенной деградации и уменьшают устойчивость склона морены, внутреннюю структуру и других элементов морены. В результате, в сочетании с другими факторами, например, с интенсивными осадками влияние времени может привести к массовым перемещениям на склоне морены [36] [46].

Наводнения, вызванные прорывами перигляциальных озер (GLOFS), могут привести к наводнениям большой силы, гибели людей, разрушению имущества и выносу наносов в низовья рек [37]. Существует восемь основных причин, пять из которых характеризуются как динамические, а три - как долгосрочные. Подводя итог, становится понятно, что наводнения, вызванные прорывами приледниковых озер, тесно связаны с различными природными

факторами и явлениями. Наиболее частыми причинами прорывов моренных плотин являются обвалы в озеро, при которых в перемещаемом материале преобладает вода в твердом состоянии (ледопады, ледяные лавины и снежные лавины) [46].

ГЛАВА 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование горного массива Монгун-Тайга началось с путешествия профессора Томского университета В.В. Сапожникова в 1909 г. Профессор первым отметил наличие ледников на территории массива [29]. Главная вершина горного массива была покорена альпинистами впервые в 1946 году [16]. В 1962 г. с целью исследования ледников массива Е.Д. Донченко провел дешифрирование аэрофотоснимков. Общая площадь оледенения массива была определена равной 50 км² [13]. В 1965 году Ю.П. Селиверстов закартировал 30 ледников, описал их характеристики, сделал фотографии всего массива и некоторых его ледников [27]. Позднее В.С. Ревякин, а ещё позже Р.М. Мухаметов [18] уточняли характеристики оледенения массива, описанные Селиверстовым. С 1988 года осуществляется комплексное изучение горных ландшафтов Центрально-Азиатской экспедицией факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского университета. Проводились исследования ландшафтной структуры, геоморфологических особенностей, современного и древнего оледенения массива, а также проводились гидрометеорологические наблюдения [26].

Современные исследования динамики многолетних снежников и снежно-фирновых полей связано с фамилиями: Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г. и Чистяков К.В. В своих работах, сравнивая данные об изменении высоты нижней границы пояса многолетних снежников и фирновой границы на ледниках пришли к выводу, что в вертикальном плане фирновая граница изменяется меньше, а временной отрезок между климатическим изменением до начала движения границы больше. В результате сокращения количества осадков в 2000-2008 гг. большинство снежников массива исчезло, но ещё большим показателем реакции на климатические изменения является распад бывшей единой зоны питания ледников главной вершины на группу фирновых пятен, которые не всегда напрямую контактируют друг с другом, фактически являясь теми же снежниками, но на ледяной поверхности [6; 7].

К.В. Чистяков, Д.А. Ганюшкин, Ю.Н. Курочкин в своей совместной работе доказывают, что нивально-гляциальные объекты территории горных массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола образуют единую систему. Динамика погребённых льдов тесно связана с динамикой края ледников. В последние годы у краев ледников наблюдается увеличение аккумуляции снега из-за затрудненного стока вызванного продолжением сноса материалов образуется фронтальный вал. Результатом этого явления становится образование наледи вместе со снежником между краем ледника и валом. Данные образования замедляют отступление и таяние края ледника [34].

Авторы приходят к выводу, что современная динамика нивально-гляциальных систем рассматриваемого района определяется чередованием холодных влажных и тёплых сухих климатических интервалов. Предполагается, что происходит переход к прохладной и влажной фазе [34].

Прорывы моренных и приледниковых озер заслуживают особого внимания, поскольку являются серьезными ледниковыми катастрофами, которые происходят в разных регионах нашей планеты (Björnsson, 1976; Нуркадилов и др., 1986; Попов, 1987; Черноморец и др., 2007; Докукин и Хаткутов, 2016; Боронина и др., 2019). Как правило прорыв приледникового озера способен нанести огромный ущерб инфраструктуре расположенных ниже по течению населенных пунктов, а зачастую и унести человеческие жизни в результате формирования селевых потоков или создания катастрофического паводка (Виноградов, 1977; Richardson and Reynolds, 2000; Черноморец и др., 2003; Clarke, 2003). В связи с этим оценка риска прорыва моренных и приледниковых озер является важной задачей, связанной с изучением и прогнозированием опасных природных явлений. Для решения этой задачи применяются разнообразные методические подходы, такие как физическое и математическое моделирование, дистанционное зондирование, эмпирические формулы и другие (Виноградов, 1976; 1977; Haeberli, 1983; Costa, 1985; Мочалов и Цукерман, 1982; Reynolds, 2003; Huggel et al., 2004; Беликов, 2005; Докукин и Хаткутов, 2016; Попов и др., 2019; Пряхина и др., 2019). Оценка риска также

может быть основана на балльной системе как в работах (Reynolds, 2003; Huggel et al., 2004), которая позволяет идентифицировать опасные объекты на основе общей информации после визуального осмотра плотины и озера. Однако для верификации моделей и проверки методик необходимы натурные наблюдения, которые ограничены из-за труднодоступности этих водных объектов, часто расположенных в отдаленных районах, где сложно организовать мониторинг. Поэтому на начальных этапах исследования широко используются методы дистанционного зондирования Земли, которые позволяют быстро получить необходимые характеристики, как это было сделано в работе (Черноморец и др., 2018). Использование космических снимков для мониторинга озер обусловлено их способностью отслеживать изменения в сезонной и годовой изменчивости.

В работе «Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга» авторы изучали потенциально прорывоопасные озёра горного массива Монгун-Тайга. В результате оценки прорывоопасности выполненной по методике балльной оценки, на основе данных дистанционного зондирования Земли, позволила отнести большинство озёр к класс высокой прорывоопасности. Озёра, исследуемые в полевых условиях авторами работы, относятся к позднеголоценовым моренам, что позволяет с определенностью говорить о высокой прорывоопасности таких водных объектов. Авторы отметили, что метод балльной оценки для определения прорывоопасных озер не является универсальным и требует учитывать особенности каждой конкретной территории и хорошо подходит для предварительного анализа на больших территориях. Также значительную погрешность имеет и способ определения морфометрических характеристик водных объектов по спутниковым снимкам [24].

15 июля 2012 г. в результате выпадения проливных дождей, произошел катастрофический спуск моренно-подпрудного озера Маашей. Из-за этого явления в последние годы сильно возрос интерес к проблеме опасных гидрологических явлений на Алтае. Причиной спуска озера послужил размыв каменного глетчера, являющимся естественной плотинной озером. В результате

образовался мощный прорывной паводок, сформировавший разрушительный селевой поток [10].

Большинство научных исследований, связанных с изучением прорывов моренных озёр, фокусируются на процессе формирования прорывных паводков и выявлении факторов, влияющих на них [Кидяева и др., 2018; Emmer, Cochachin, 2013; Neupane et al., 2019]. Однако исследования формирования и развития приледниковых водоемов получают гораздо меньше внимания и имеют меньшее количество публикаций. Горная территория Алтая относительно мало изучена в этом контексте несмотря на то, что, согласно исследованиям Ганюшкина Д.А. и др. [8], она подвергается сокращению оледенения, что приводит к увеличению числа моренно-подпрудных озёр.

В работе «Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия» авторы выделяют этапы развития приледникового озера Нурган и факторы, влияющие на него. Трансгрессивная стадия развития озера продлилась около 150 лет, за это время образовавшееся котловина заполнилась тальми ледниковыми водами, в результате озеро превратилось в моренно-подпрудное. Авторы полагают, что в период максимального заполнения озера, весь сток с ледника поступал в его котловину. Следующей фазой, является регрессивная фаза, переходом послужил прорыв моренной перемычки, который привел к частичному спуску озера. Основной причиной прорыва стало давление воды на плотину и внутренние процессы в морене, такие как фильтрация и протаивание мерзлого грунта. После разрушения моренной перемычки озеро постепенно наполнялось. На данный момент озеро относят к квазистабильному. Однако, слабо развитый канал стока из озера и колебания уровня воды, наличие участков с термокарстовыми процессами в моренной перемычке, возможность обвала и перекрытия текущего канала стока моренным материалом или интенсивное таяние ледника Эрегтийн при условиях современного потепления, может привести к росту уровня воды и вернуть активную фазу озера [23].

ГЛАВА 3. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Монгун-Тайга

Горный массив Монгун-Тайга расположен на юго-западе республики Тыва. Массив находится на стыке Русского и Монгольского Алтая, системы Саян-Танну-Ола и горного обрамления Котловины Больших Озер. Массив находится на северо-западе бессточной Внутренней Азии и относится к бассейну Котловины Больших Озер. Одноименная вершина массива имеет высоту 3970,5 м выше уровня моря и имеет координаты $50^{\circ}16'30''$ с. ш. и $90^{\circ}08'00''$ в. д. [9].

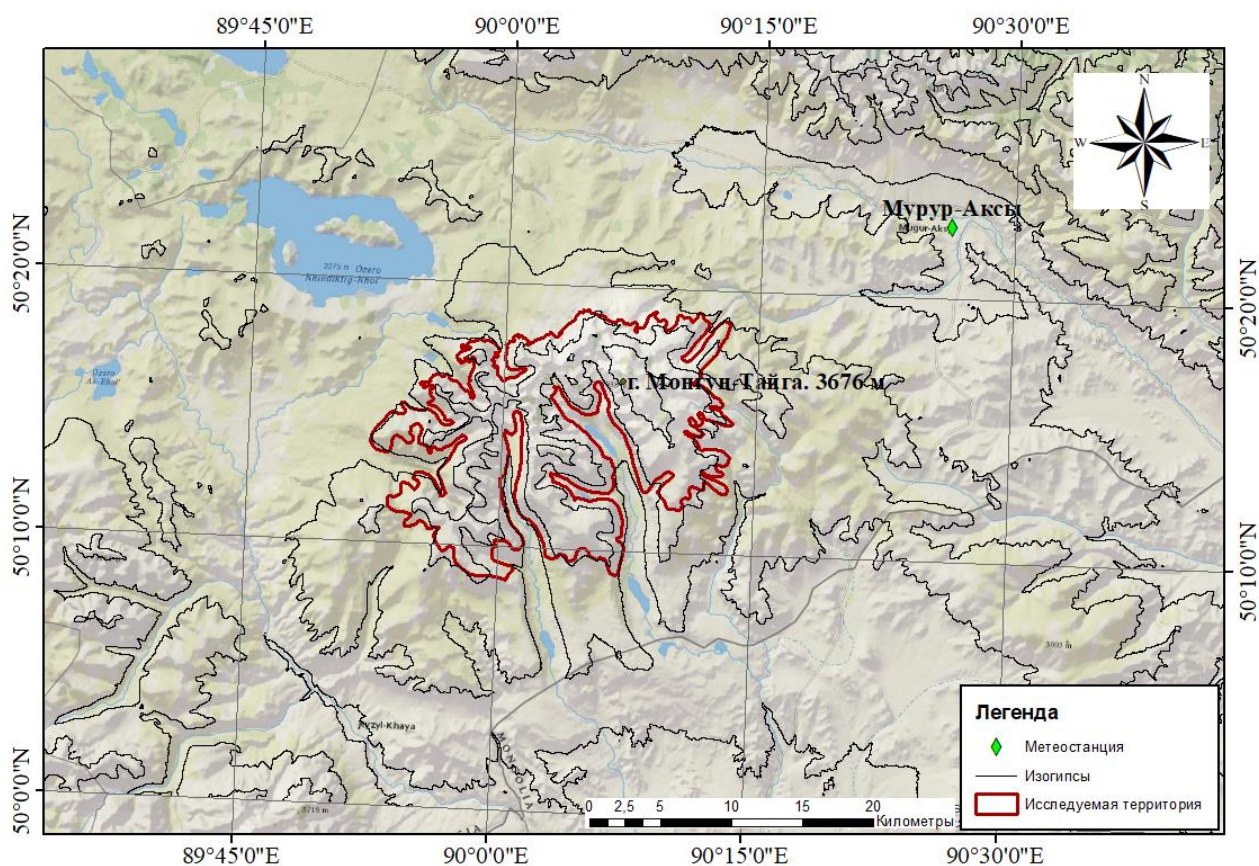


Рис. 1. Картограмма горного массива Монгун-Тайга.

В строении горного массива Монгун-Тайга выделяется две структурно-фациальные зоны – Саяно-Шапшальская и Тувинская, имеющие существенные различия в строении стратиграфического разреза. Саяно-Шапшальская зона сложена протерозойскими, кембрийскими, ордовикскими, силурийскими и в меньшей степени девонскими и юрскими отложениями. В Тувинской зоне в основном представлены девонские образования.

Горный массив является структурным элементом Чулымского поднятия или Монгунтайгинской антиклинали, сложенной складчатым комплексом фундамента, в строении которого принимают участие отложения докембрия и кембрия, претерпевшие интенсивные изменения с образованием напряженных складок линейного типа.

Согласно геологической карте масштаба 1:3300000 [Геология Тувинской АССР, 1990] к протерозойским отложениям отнесены гнейсово-сланцевые образования (джебашская свита) и существенно сланцево-карбонатные отложения (баратальская свита) [6].

Поверхность территории горного массива Монгун-Тайга представлена ледниками, современными моренами и крутыми склонами гравитационного сноса. На территории морен практически нет растительности, местами могут встречаться криопетрофитные группировки, например, в среднегорьях это лапчатка снежная, курильский чай и куртины полыни, прорастающие на небольших участках петрозёма. Почвенный покров отсутствует, поверхность представлена обломками горных пород разных фаций.

3.1.1 Климат

Климат массива определяется его расположением в центре Азии. Монгун-Тайга находится на территории Алтае-Саянской горной страны. Большая годовая амплитуда температуры воздуха, малое количество осадков и их неравномерное сезонное распределение. За три летних месяца выпадает 65% годового количества осадков, минимум осадков наблюдается в зимний сезон.

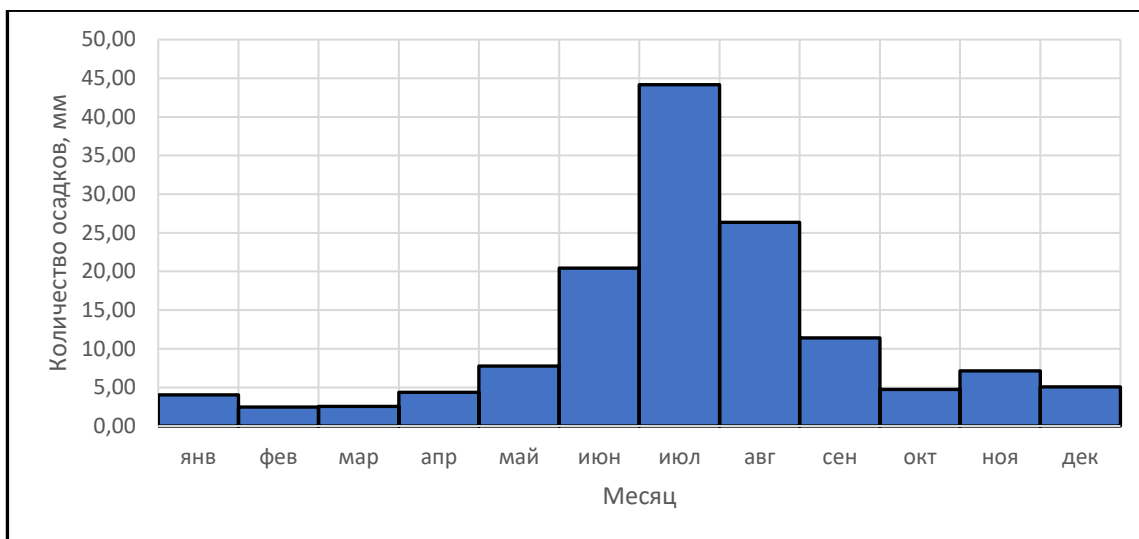


Рис. 2. Среднемесячные значения осадков со станции Мугур-Аксы с 1966 по 2010 гг [3].

Тепло и влага распределены неравномерно на территории массива из-за его значительной высоты и сложного рельефа. Максимальное количество осадков выпадает на наветренных склонах и в высокогорном поясе. Средняя многолетняя величина осадков, по экспедиционным данным, не превышает 310 мм.

В зимнее время года до высоты 1500 м над уровнем моря преобладают ветра восточного и юго-восточного направлений. Однако, с высотой больше 2000 м над уровнем моря господствует западный общециркуляционный перенос воздушных масс, с ветрами западного и северо-западного направлений.

В летний период на территории массива господствуют ветра западного и северо-западного направления. Но из-за того, что в это время года интенсивность западного переноса ослаблена, то и устойчивость результирующего ветра существенно ниже, чем зимой [6].

3.1.2 Современное оледенение

В условиях низких температур и малого количества осадков в высокогорье установлены современное оледенение, многолетние снежники, наледи и погребенные ледниковые льды. С конца 1980-х годов географы Санкт-Петербургского государственного университета детально изучают нивально-гляциальные системы юго-восточного Алтая. Определение скоростей изменения

ледников, цикличности динамики и выявление зависимости происходящих процессов с изменениями климата – являются одними из важнейших задач исследования.

В качестве основных способов исследований научные сотрудники использовали маршрутные наблюдения, GPS-привязки краёв ледников и установка реперов у концов ледников [34]. Также используются космические снимки высокого разрешения, полученные спутниками Landsat-7, Landsat-8 и Spot-5. Для оценки климатических характеристик использовались данные, полученные с государственной метеорологической станции Мугур-Аксы, а также данные инструментальных метеорологических и гидрологических наблюдений авторов в разные годы в перигляциальной зоне и на ледниках.

Объем ледников постепенно уменьшается с середины XIX века, после прохождения максимума малой ледниковой эпохи. Максимальные темпы сокращения объемов ледников отмечались в начале XXI века (примерно 1,6-1,7% в год).

В 2013 году из-за аномально снежных условий и малой абляции ледники не отступали, также в этом году ко многим языкам примкнули крупные снежники и наледи. Например, наледь у края ледника Восточный Мугур заняла всё пространство приледникового зандра, а приращение по длине составило около 100 м [34].

По состоянию на 2010 год на территории массива насчитывается 32 ледника суммарной площадью 20,3 км².

Самый крупный ледник горного массива, Восточный Мугур, относящийся к долинному морфологическому типу, начинается на склоне главного водораздела Монгун-Тайги. Он разветвляется на разделённые скальными выходами отдельные потоки, приуроченные к днищам двух цирков на высоте 3690 м. Ниже располагается цирк большего размера, на дне которого потоки смыкаются в один ледниковый язык. Образованная срединная морена возвышается на 10-15 м над поверхностью ледника. В середине 1990-х морена находилась практически на одном уровне с поверхностью ледника. Таким

образом, высота морены показывает прежнюю мощность ледника и отражает снижение поверхности за последние годы.

С высоты 2920 м поток круто низвергается вниз, давая начало реке Восточной Мугур. Между концом ледника и началом водотока присутствует небольшая по мощности наледь, которая раньше в зависимости от климатических факторов могла прирастать к телу ледника.

За последние годы язык ледника потерял около 10-15 м мощности и начал приобретать вогнутую форму.

Ледник Правый Мугур – считающимся самым динамически активным из всех долинных ледников массива Монгун-Тайга. Такой вывод был сделан из-за максимального количества трещин в леднике. Данное явление связано с наибольшей крутизной ледника, равной 21°.

В следствии интенсивного бронирования правой составляющей ледника и ее слияния с центральной мореной происходит высвобождения из-под льда правой части скального гребня, а также увеличивается физическое выветривание на правом крутом склоне, окаймляющем ледник [6].

Наиболее динамичными из всех элементов нивально-гляциальных систем являются снежники. За период с 1966 по 2008 г их площадь сократилась в 15 раз, а количество в 4 раза, высота нижней границы поднялась на 250-300 м ближе к вершине массива. Однако, в следствии климатических факторов в 2008-2011 гг. тенденция имела обратный характер, нижняя граница пояса опуталась на 250 м, в это время происходило формирование новых снежников на поверхности ледников. Как уже отмечалось, благоприятные условия для формирования снежников повторились и в 2013 г. В этот год выросли мощности и площади ранее существующих снежников, появились новые снежники и увеличилось их морфологическое разнообразие [34].

3.2 Таван-Богдо-Ола

Горный массив Таван-Богдо-Ола расположен на границе Российской Федерации, на юге республики Алтай, Монголии и Китая в центральной части Алтайских гор. Высшая точка массива – гора Куйтэн-Уул имеет высоту 4374 м

выше уровня моря и имеет координаты $49^{\circ}08'45''$ с. ш. и $87^{\circ}49'09''$ в. д. По территории массива проходит водораздел между бассейном Северного Ледовитого океана и бессточным бассейном котловин Центральной Азии. По северной стороне проходит водораздел бассейнов рек Аргут, Иртыша и Кобдо.

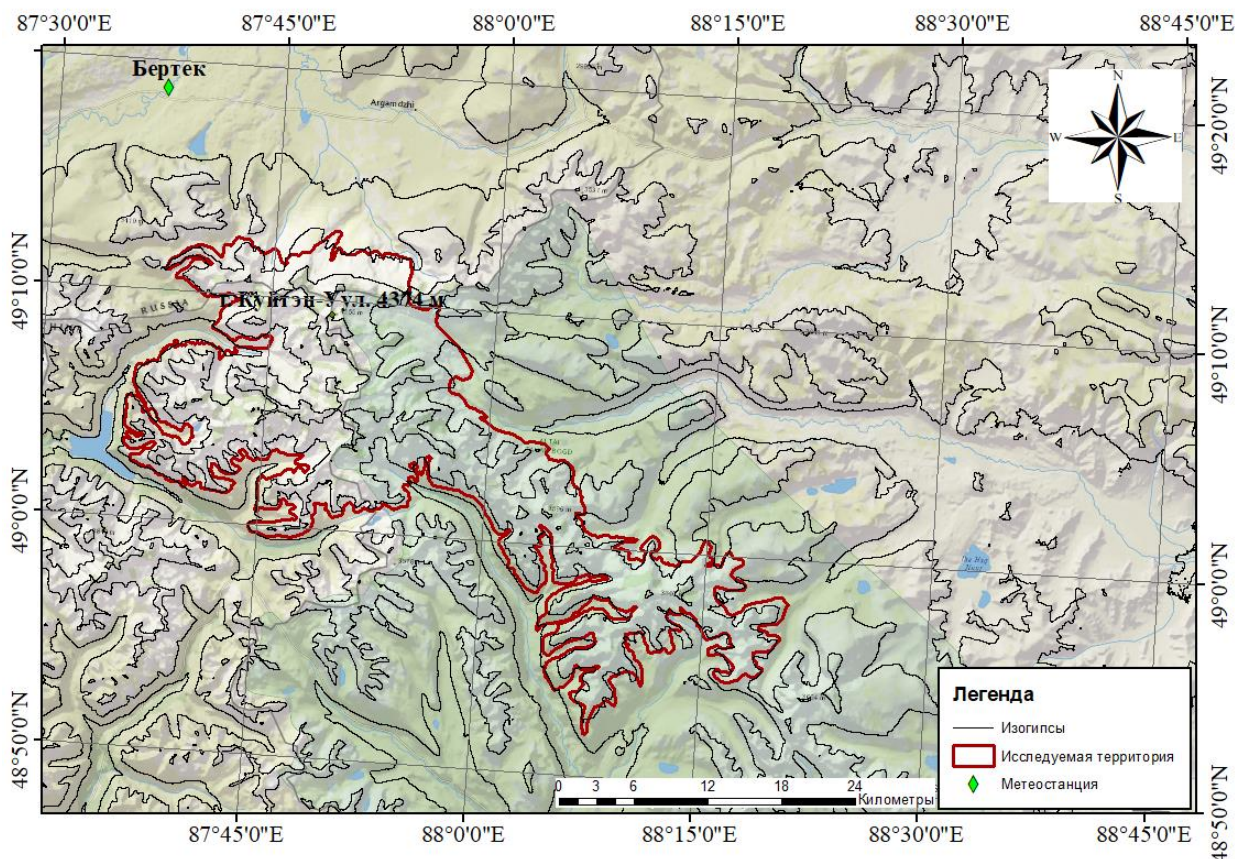


Рис. 3. Картограмма горного массива Таван-Богдо-Ола.

К западу от массива находится горный хребет Южный Алтай, с востока – хребет Сайлюгем, а с юга – Монгольский Алтай. На северном склоне массива резкий уклон, являющийся границей с плоскогорьем Укок. Массив сложен в основном из метаморфических сланцев и гранитов. Также встречаются Диориты, базальты, кварциты, гнейсы.

Горный массив расположен на пересечении нескольких тектонических структур. На его территории представлены высокогорные пики, остроконечные вершины, ущелья, долины и ледниковые формы рельефа. Формы рельефа связанные с платформенными и орогенными процессами свидетельствуют об активной тектонической истории региона. В настоящее время огромное влияние

на формирование горных ландшафтов оказывают такие геологические процессы как эрозия, абразия, осадочные процессы накопления отлагаемых материалов и ледниковая деятельность.

3.2.1 Климат

Климат горного массива определяется резко континентальным, поскольку расположен массив в центре континента вдали от океана. Ближайшая метеостанция Бертек (2200 м) собирала данные с 1959 по 1982 г.

По полученным данным у подножья массива средняя летняя температура довольно низкая и составляет $8,2^{\circ}\text{C}$, а среднегодовая температура - $8,3^{\circ}\text{C}$ ниже нуля. Характерна большая годовая амплитуда температур, малое количество осадков (200,6 мм) и их неравномерное сезонное распределение. Наблюдается летний максимум осадков и малоснежная зима.

В силу схожести географического положения и основных климатических характеристик, диаграммы среднемесячных осадков исследуемых массивов очень похожи, однако есть и различия: в отличие от горного массива Монгун-Тайга летний максимум осадков более растянутый и плавный. Июльский пик, по сравнению с Монгун-Тайгой более сглажен, это свидетельствует о том, что летнее половодье длится дольше.

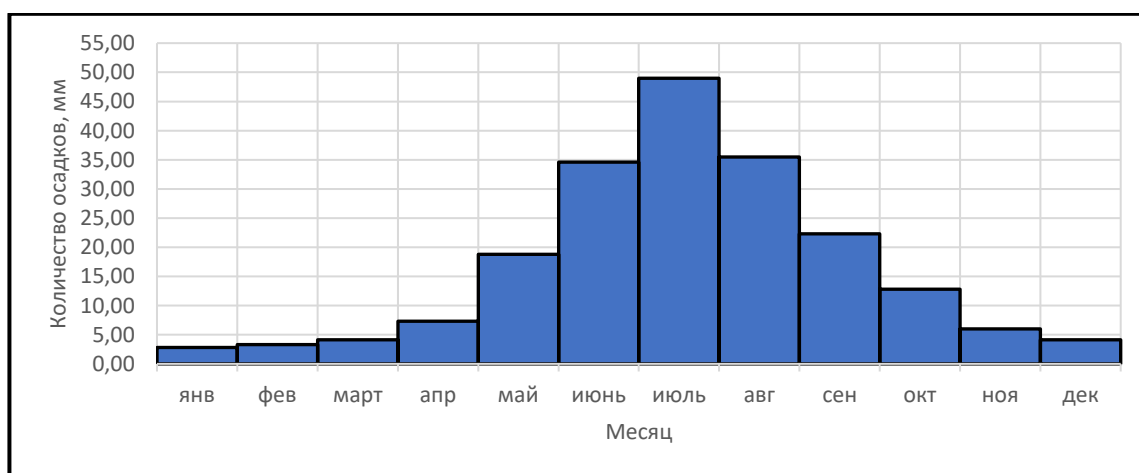


Рис. 4. Среднемесячные значения осадков со станции Бертек с 1960 по 1981 гг [3].

3.2.2 Современное оледенение

Ледники массива являются крупнейшими на Алтае. Крупнейшие ледники массива расположены на южных склонах массива. Изучение ледников массива началось в 1897 г. В.В. Сапожниковым [29], в XX столетии исследования продолжились Б.В. и М.В. Троновыми, В.С. Ревякиным и Р.М. Мухаметовым, Н.Н. Михайловым, А.Г. Редькиным, А.Н. Рудым.

На северном склоне насчитывается 12 ледников суммарной площадью 22,39 км² [28].

В общей площади оледенения на северном склоне массива Таван-Богдо-Ола наибольшую долю, около 40%, составляют крупные долинные и карово-долинные ледники, в то время как малые висячие и склоновые ледники преобладают в количественном плане. Большинство ледников формируют комплексы, где куполовидные ледниковые вершины и плосковершинные ледники выступают в качестве ядра, от которого радиально расходятся другие ледники. В условиях недостатка осадков в высокогорье (300-400 мм в год), ледники существуют благодаря высокому гипсометрическому положению и низкой абляции, либо за счет большого количества снега на подветренных склонах, который накапливается благодаря лавинному и метелевому переносу [34].

В верхней части массива расположено 35 ледников общей площадью примерно 150 км². Крупнейшими ледниками являются ледник Потанина (19 км; 56,5 км²) и Пржевальского (10,8 км; 30 км²) названия ледники получили в честь русских исследователей. На территории морен практически нет растительности, ниже расположены горные тундры и альпийские луга.

В настоящее время ледники массива стремительно тают, так в 1968 суммарная площадь ледников составляла 242 км², в 1987 уменьшилась до 223 км², в 2010 равнялась 201 км², а в 2020 уже 192 км².

Временная изменчивость нивально-гляциальных систем рассматриваемых районов определяется чередованием холодных влажных и тёплых сухих климатических периодов. Результатом климатических изменений может быть

как быстрые и явные изменения, например временная изменчивость снежников, так и асинхронные, глобальные изменения масштабных нивально-гляциальных систем [34].

ГЛАВА 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С начала 1980-х годов географы Санкт-Петербургского государственного университета активно изучают горные массивы Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола. Эти регионы привлекают внимание исследователей своей уникальной природой и значимостью для научных исследований. Основным объектом исследования является современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Юго-Восточного Алтая. Однако перигляциальные озёра массивов изучены недостаточно и требуют не меньшего внимания к изучению и наблюдениям, особенно в условиях современного изменения климата.

Для изучения временной изменчивости морфометрических характеристик перигляциальных озёр, расположенных на современных моренных отложениях, были использованы данные дистанционного зондирования Земли, полученные со спутников Landsat 2, 4, 5, 7, 8, а также WorldView-2 [earthexplorer.usgs.gov]. Для анализа высотного распределения была использованная цифровая модель рельефа [earthexplorer.usgs.gov].

В ходе исследования горного массива Монгун-Тайга были использованы космические снимки 1977, 1989, 2001, 2015 и 2019 годов. Для анализа озёр горного массива Таван-Богдо-Ола были выбраны 1977, 1989, 2000, 2016 и 2021 года. Причиной выбора этих лет послужила задача изучить временную изменчивость морфометрических характеристик перигляциальных озёр за равномерный и наиболее продолжительный возможный временной период. Для получения наиболее показательных результатов были использованы снимки за летний период, преимущественно сделанные в июле, поскольку в это время года в исследуемом регионе наблюдаются максимальные температуры, соответственно наблюдается и максимальное таяние ледников, а значит приледниковые озёра подвержены максимальной изменчивости. Для корректного получения информации на снимке должен быть максимально низкий процент облачности, поэтому не всегда имеется возможность использовать снимок, полученный за необходимый год.

В результате развития технологий совершенствовалось качество снимков, так например снимок 1977 года был сделан со спутника Landsat 2 и имеет разрешение 60 м, а использованный снимок 2015 года, сделанный со спутника WorldView-2, с разрешением в 0,5 м, превосходит качеством изображения в 120 раз. Для корректного анализа информации со снимков была установлена минимальная площадь исследуемых озер, которая составила 3600 м².

Спутники программы Landsat делают снимки в разных спектральных каналах. Для получения изображения и его последующего изучения, данные со спутников Landsat необходимо обработать и преобразовать в необходимый для работы синтез каналов. Наиболее подходящие для выделения водных объектов являются следующие комбинации каналов: Red, Green, Blue; NIR, SWIR, Red.

На спутниках Landsat 7 и 8 появился дополнительный, панхроматический (Panchromatic, PAN) канал, позволяющий улучшить качество изображения до расширения 15 м, вместо 30 м. Это позволяет более точно определять границы объектов и получать более точные данные.

Таблица 1. Характеристики использованных космических снимков для горного массива Монгун-Тайга

Год	Спутник	Разрешение, м
1977	Landsat 2	60
1989	Landsat 5	30
2001	Landsat 7	30 (PAN 15)
2015	WorldView-2	0,5
2019	Landsat 8	30 (PAN 15)

Таблица 2. Характеристики использованных космических снимков для горного массива Таван-Богдо-Ола

Год	Спутник	Разрешение, м
1977	Landsat 2	60
1989	Landsat 4	30
2000	Landsat 7	30 (PAN 15)
2016	WorldView-2	0,5
2021	Landsat 8	30 (PAN 15)

4.1 Выделение перигляциальных озёр с использованием космических снимков

Исследуемая территория ограничивается молодыми моренами и склонами горных массивов сложенные элюво-делювием, включающая в себя ледники. Исходя из определения перигляциального озера, они находятся именно в этой области.

Для получения комплексных данных на территории исследуемых массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола отобранные снимки обрабатывались с помощью программы ArcGIS. Произведенный анализ снимков за разные года и перевод зеркал перигляциальных озёр в векторный вид путём визуального дешифрирования позволили получить следующие данные: площадь территории, включающая в себя ледники, морены и склоны, сложенные элюво-делювием; суммарные площади озёр; количество озёр. На основе этих данных были рассчитаны такие параметры как коэффициенты озёрности исследуемых территорий, средняя высота поверхности озёр, а также построены диаграммы высотного распределения количества и площадей озёр на территории исследуемых массивов.



Рис. 5. Исследуемая территория горного массива Монгун-Тайга.

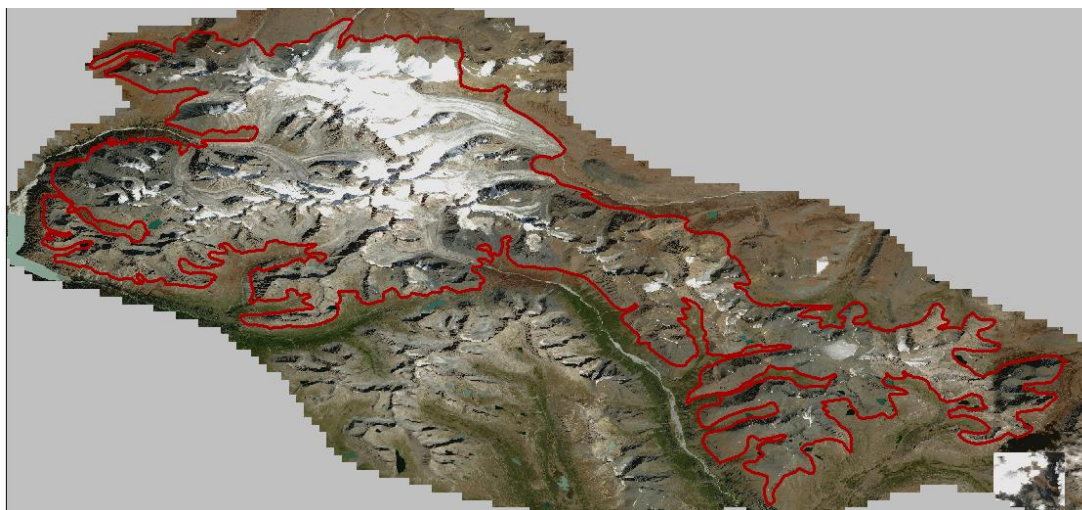


Рис. 6. Исследуемая территория горного массива Таван-Богдо-Ола.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ОЗЁР ЗА РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПЕРИОД

Отдельного внимания заслуживают озёра получающие питания с крупных ледниковых систем массивов. В горном массиве Монгун-Тайга было выбрано озеро питающиеся талыми водами долинного ледника Селиверстова, который считается вторым по площади, уступая только леднику Восточный Мугур (3,84 км², 2010 год). Площадь ледника Селиверстова на 2010 год равняется 2,78 км² [35].

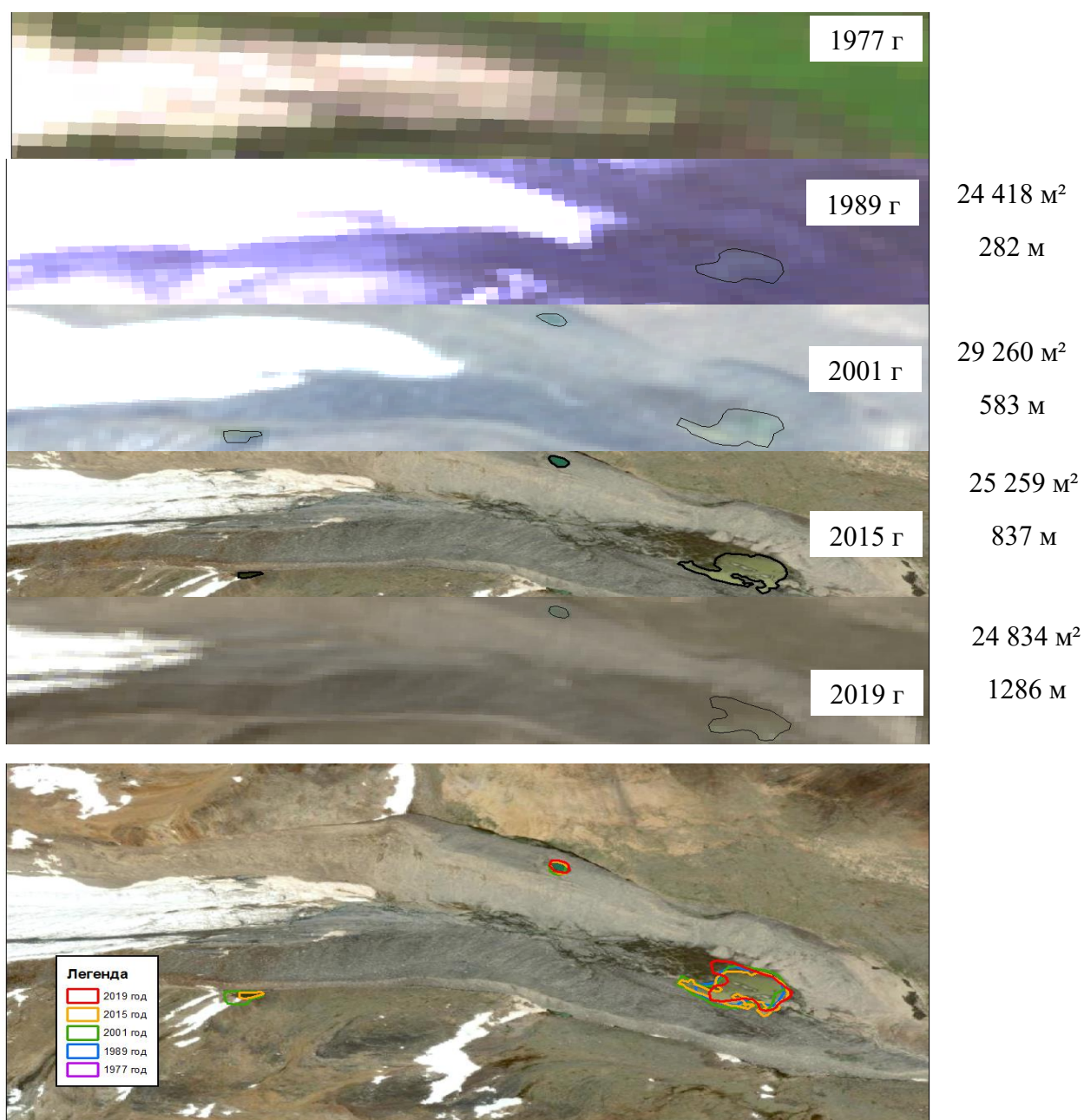


Рис. 7. Временная изменчивость перигляциального озера на горном массиве Монгун-Тайга. Долинный тип ледника.

Исследуемое перигляциальное озеро расположено на высоте 3052 м выше уровня мирового океана. Координаты озера – 50°15'42'' с.ш. и 90°11'31'' в.д. В 1977 году на краю ледника озеро ещё не сформировалось. К 1989 году на месте, где 12 лет назад находился край ледника Селиверстова образовалось перигляциальное озеро с площадью зеркала 24 418 м², расстояние до края ледника составляло 282 м. Ещё через 12 лет озеро увеличилось в размере, достигнув своего максимального размера в 29 260 м², а расстояния до края ледника уже составило 583 м. После этого площадь поверхности озера начала постепенно уменьшаться по мере отдаления от ледника. Так, за последующие 14 лет озеро уменьшилось на 4001 м², его площадь составила 25 259 м², расстояние до ледника 837 м. А в 2019 году уже уменьшилось на 15% от максимальной площади, край ледника также продолжает удаляться и расстояние до озера равняется 1286 метрам.



Рис. 8. График зависимости площади озера от расстояния до ледника на территории горного массива Монгун-Тайга. Долинный тип ледника.

В водосборе большинства озёр массива располагаются ледники карового типа, поэтому стоит рассмотреть изменения происходящие с перигляциальным озером, относящимся к каровому леднику.

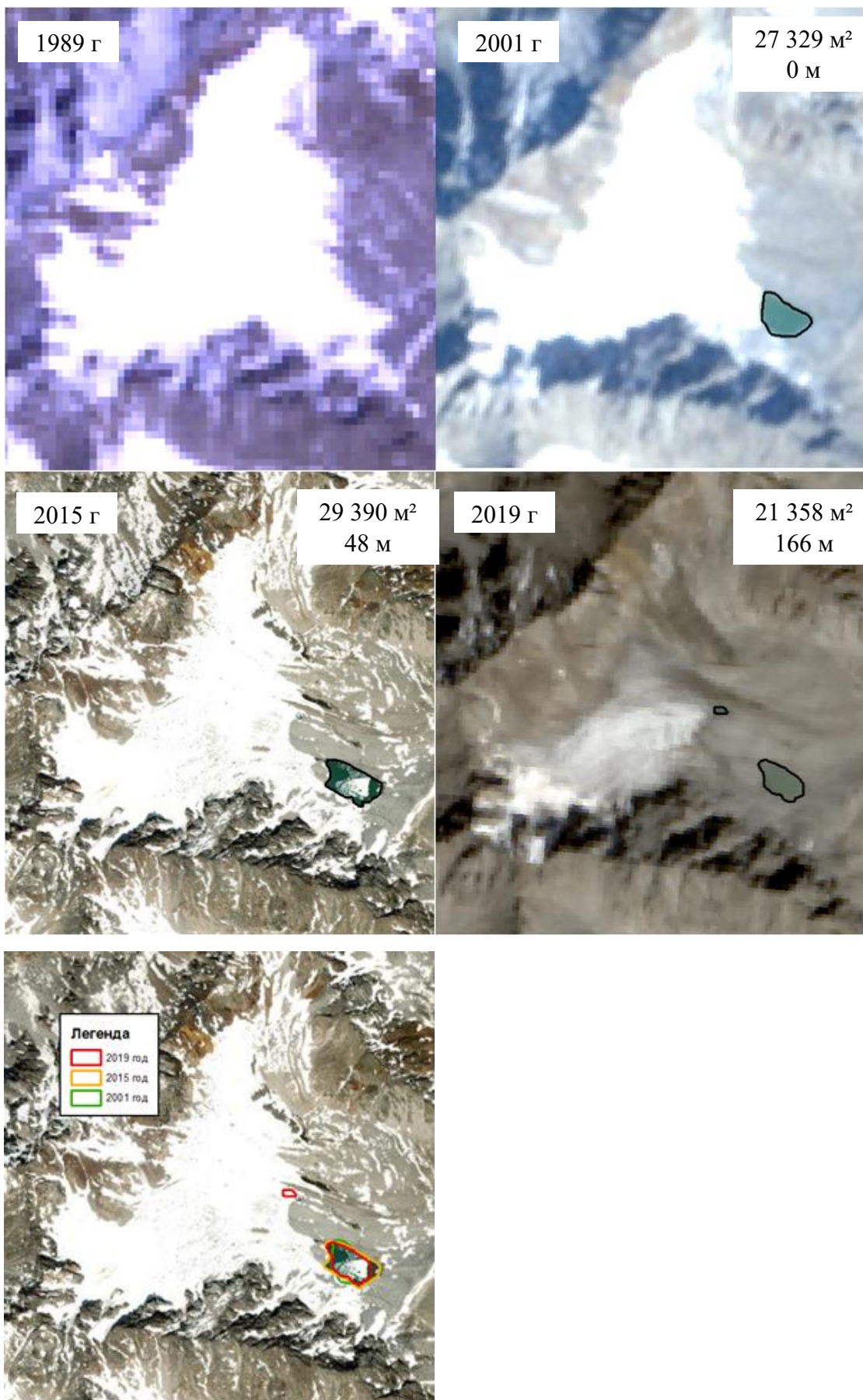


Рис. 9. Временная изменчивость перигляциального озера на горном массиве Монгун-Тайга. Каровый тип ледника.

Рассматриваемое перигляциальное озеро расположено на высоте 2913 м. Координаты озера – $50^{\circ}15'55''$ с.ш. и $90^{\circ}02'27''$ в.д. В 1989 году озеро ещё не сформировалось. В результате отступления ледника, к 2001 году на месте, где 12 лет назад находился край ледника образовалось перигляциальное озеро с площадью зеркала $27\,329\text{ м}^2$, одним из краёв которого является край ледника. В течение следующих 14 лет ледник продолжал отступать, а озеро в свою очередь увеличилось в размерах. Теперь площадь его зеркала равняется $29\,390\text{ м}^2$, что является максимальным зафиксированным показателем в проделанной работе, при этом расстояние до ледника составляло 48 м. Ещё через 4 года озеро уменьшилось в размере, теперь его площадь составила $21\,358\text{ м}^2$, а расстояния до края ледника уже составило 166 м.

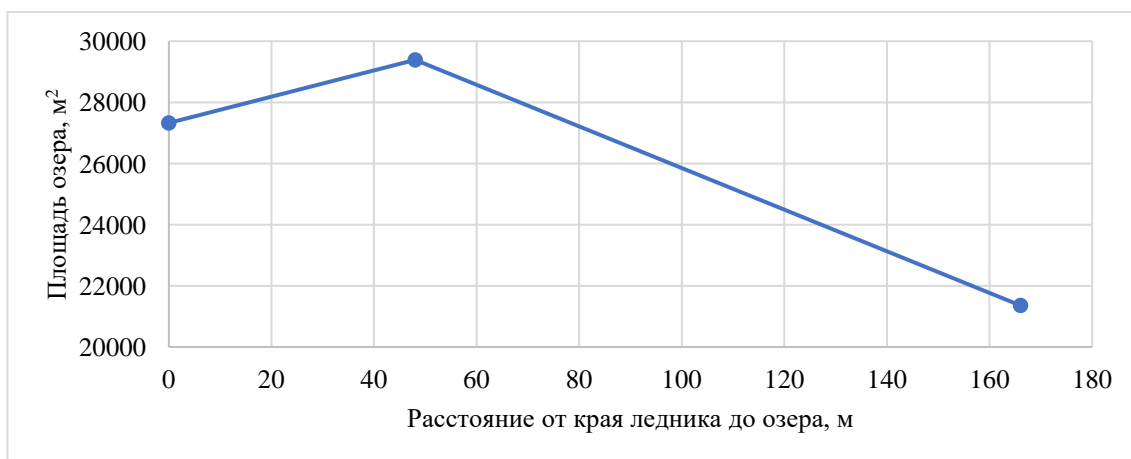


Рис. 10. График зависимости площади озера от расстояния до ледника на территории горного массива Монгун-Тайга. Каровый тип ледника.

Система ледников Потанина и Александры является крупнейшей не только на территории горного массива Таван-Богдо-Ола, но и на территории всего Алтая. В результате отступления языков этой системы ледников образовалось крупнейшее на 1989 год перигляциальное озеро горного массива, расположенное на высоте 2829 м. Координаты озера – $49^{\circ}07'34''$ с.ш. и $87^{\circ}57'32''$ в.д.

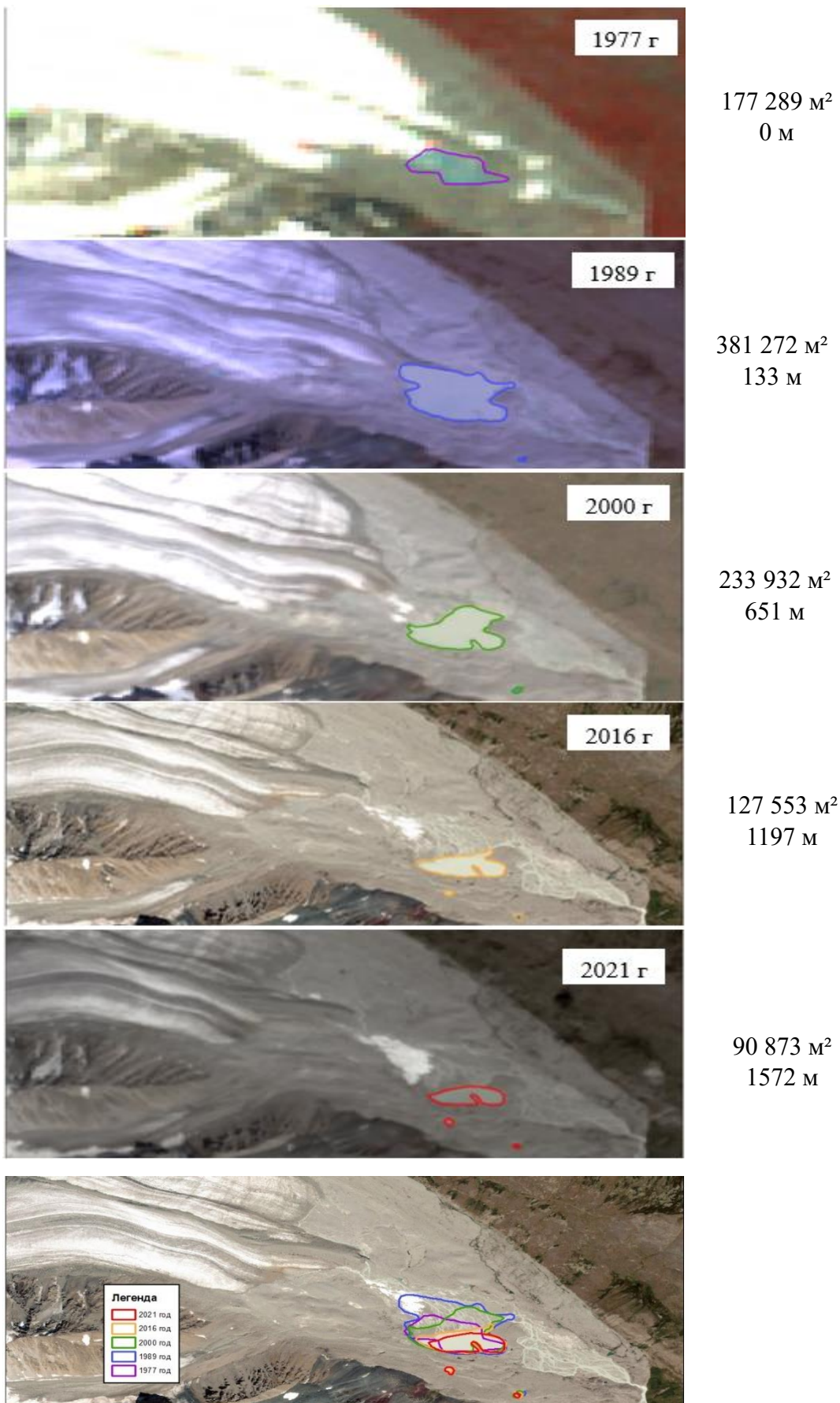


Рис. 11. Временная изменчивость перигляциального озера на горном массиве Таван-Богдо-Ола. Долинный тип ледника.

В 1977 году одной из границ перигляциального озера являются языки ледников. В 1989 году ледник отступил и площадь поверхности озера значительно увеличилась до 381 272 м² и достигла своего максимума, расстояние до ледника составило 133 метра. Каждый последующий год площадь поверхности озера постепенно уменьшалась, а расстояния от озера до ледника возрастало. Через 11 лет площадь озера сильно уменьшилась до 233 932 м², расстояние до ледника составляло уже 651 метр. Ещё через 16 лет, в 2016 году площадь озера составила 127 553 м², расстояние до ледника составило 1197 м. В итоге летом 2021 года площадь озера достигла своей минимальной отметки в 90 873 м², тем самым уменьшившись на 76% от своего максимального значения, в это время расстояние до ледника увеличилось до значения 1572 м.

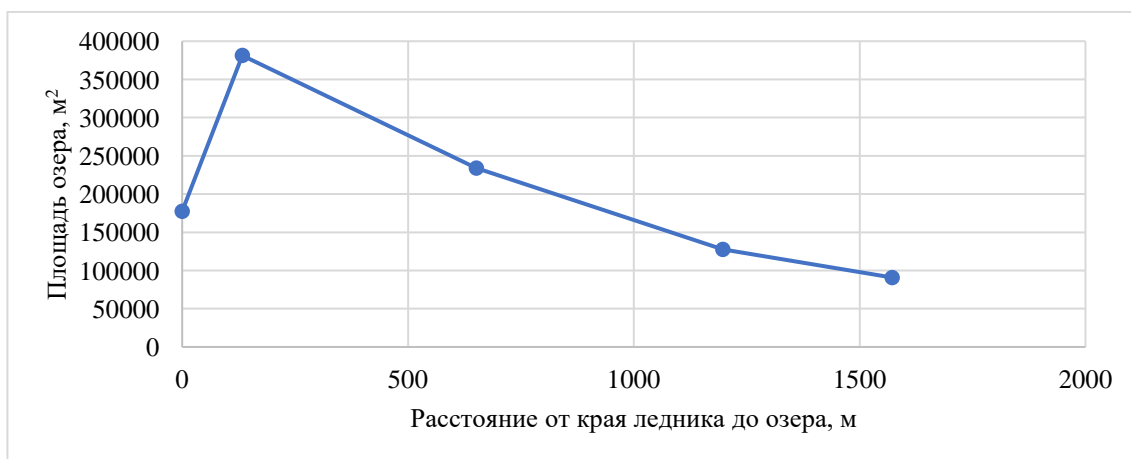


Рис. 12. График зависимости площади озера от расстояния до ледника на территории горного массива Таван-Богдо-Ола. Долинный тип ледника.

Также как и на территории горного массива Монгун-Тайга, на территории массива Таван-Богдо-Ола в водосборе большинства озёр располагаются ледники карового типа.

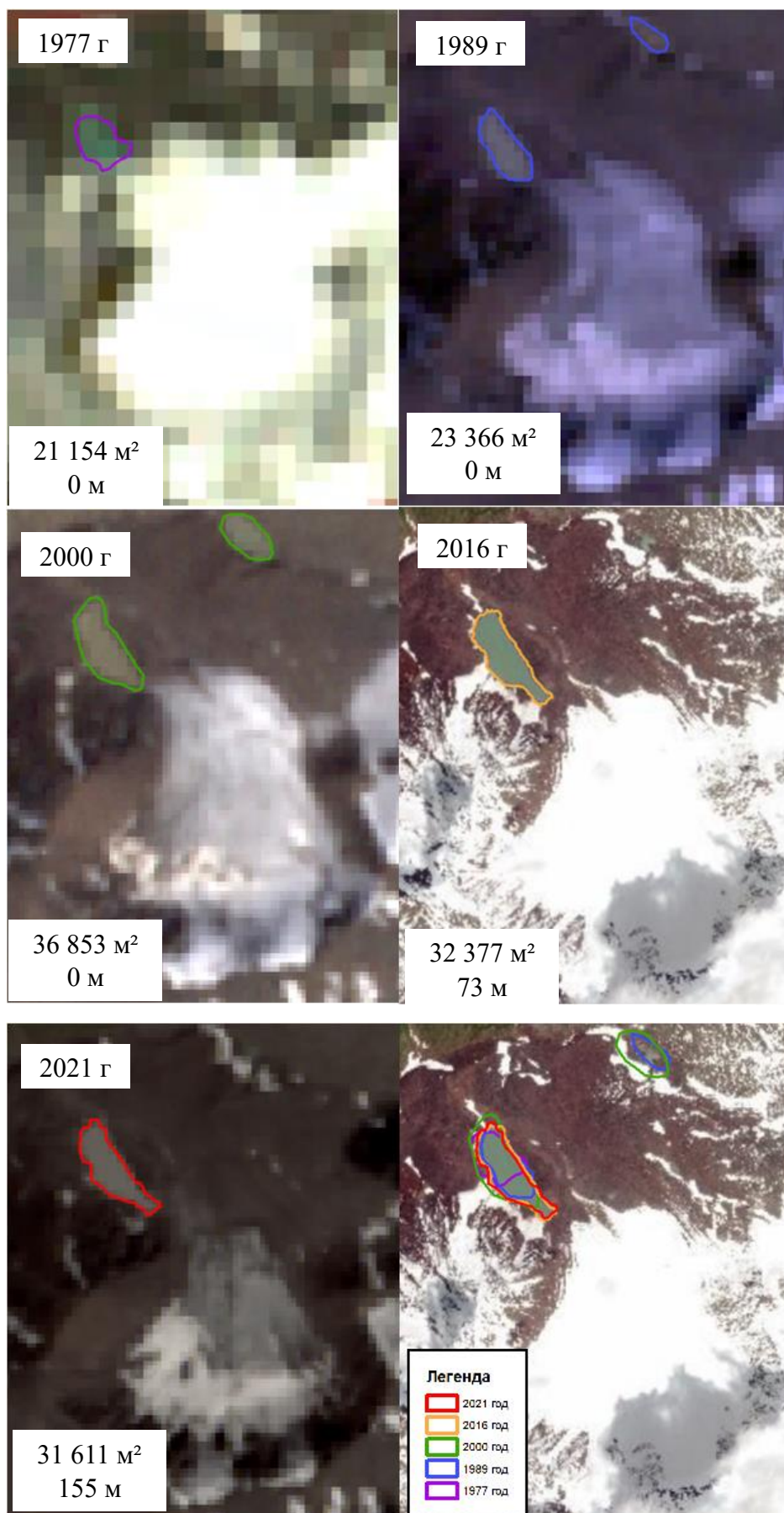


Рис. 13. Временная изменчивость перигляциального озера на горном массиве Таван-Богдо-Ола. Каровый тип ледника

В 1977 году одной из границ рассматриваемого перигляциального озера являются край ледника. Площадь озера составляет 21 154 м². В 1989 году в результате отступления края ледника площадь поверхности озера увеличилась до 23 366 м². На месте отступившего ледника была образована отрицательная форма рельефа, поэтому она заполнилась талыми водами ледника, тем самым и увеличив площадь озера. К 2000 году граница ледника изменилась не сильно, однако заметные изменения претерпела береговая линия озера, в результате чего площадь увеличилась до максимального зафиксированного значения и составила 36 853 м². Одной из границ, озеро по-прежнему примыкает к леднику. Каждый последующий год площадь поверхности озера постепенно уменьшалась, а расстояния от озера до ледника начали расти. Через 16 лет площадь озера заметно уменьшилась до 32 377 м², расстояние до ледника составило 73 метра. Ещё через 5 лет в 2021 году площадь озера ещё немного уменьшилась и достигла отметки в 31 611 м², в это время расстояние до ледника увеличилось до 155 м. Рассматриваемое перигляциальное озеро расположено на высоте 2881 м. Координаты озера – 49°11'13'' с.ш. и 87°39'47'' в.д.

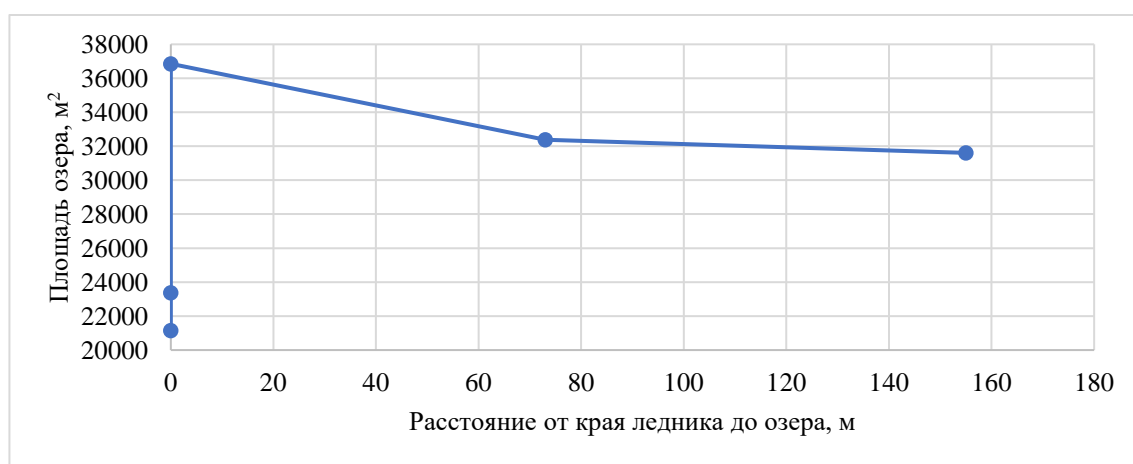


Рис. 14. График зависимости площади озера от расстояния до ледника на территории горного массива Таван-Богдо-Ола. Каровый тип ледника.

На всех графиках зависимости площади озера от расстояния до ледника присутствует явно выраженный максимум площади поверхности озера. Проанализировав графики, можно прийти к выводу, что этот максимум площади поверхности водоемов наблюдаются в начале отступления ледника от границы

зеркала озера или при непосредственном контакте с ним, поскольку в таком случае вся талая вода с ледников поступает в озёра. По мере дальнейшего увеличения расстояния до ледника, озеро начинает получать меньше питания из-за увеличения коэффициента фильтрации, а в следствии уменьшаться в размерах.

5.1 Зависимость количества и суммарных площадей озёр от площади оледенения

В современном этапе деградации ледников из-за глобального потепления нарушается стабильный режим озер, моренных массивов и ледников. При отступании ледников на современных моренных отложениях формируются новые озера, как правило относительно небольшие. На графиках временной изменчивости площадей ледников, количества озёр и площадей озёр горного массива Монгун-Тайга прослеживается отчётливая тенденция увеличения количества и площадей озёр, в то время как площадь оледенения уменьшается.

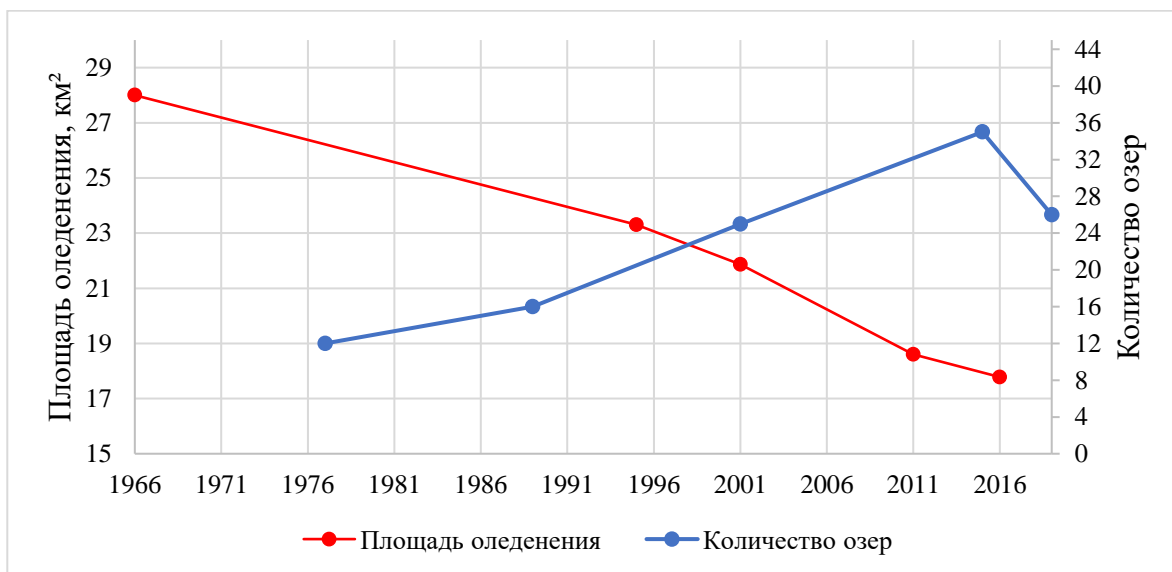


Рис. 15. Графики временной изменчивости площадей оледенения и количества озёр горного массива Монгун-Тайга.

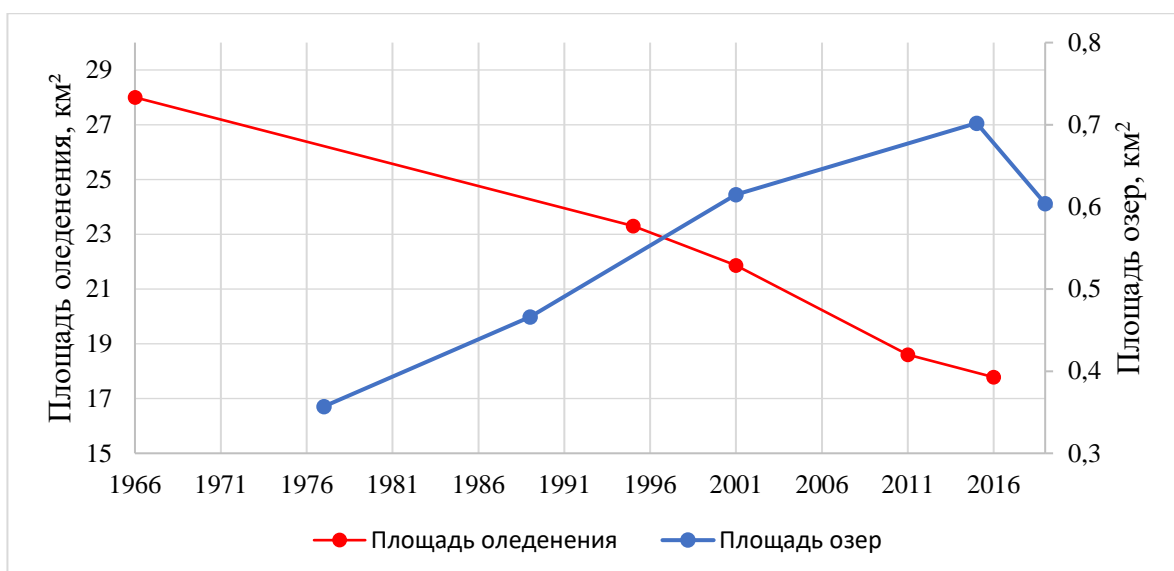


Рис. 16. Графики временной изменчивости площадей оледенения и площадей озёр горного массива Монгун-Тайга.

Максимальное питание озера получают при непосредственном контакте с ледником и в начале его отступления от границы зеркала озера. По мере дальнейшего удаления края языка ледника, озеро начинает уменьшаться в размерах. Исходя из этого можно сделать вывод, что в какой-то момент при продолжении уменьшении площадей ледников, количество и площади озёр тоже начнут уменьшаться. Графики показывают, что этот процесс уже начинает прослеживаться на территории массива Монгун-Тайга, а тенденция изменилась в период с 2015 по 2019 год. Количество озёр уменьшилось почти до значения 2001 года, а суммарная площадь озёр стала меньше на 1,79% по сравнению с 2001 годом и на 13,96% меньше по сравнению с 2015 годом.

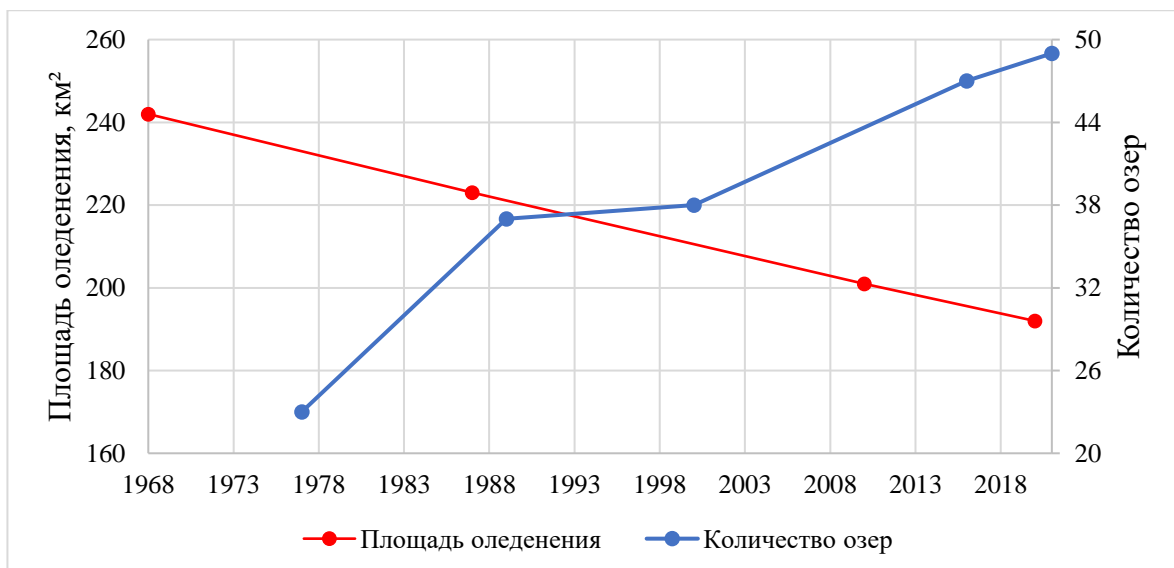


Рис. 17. Графики временной изменчивости площадей оледенения и количества озер горного массива Таван-Богдо-Ола.

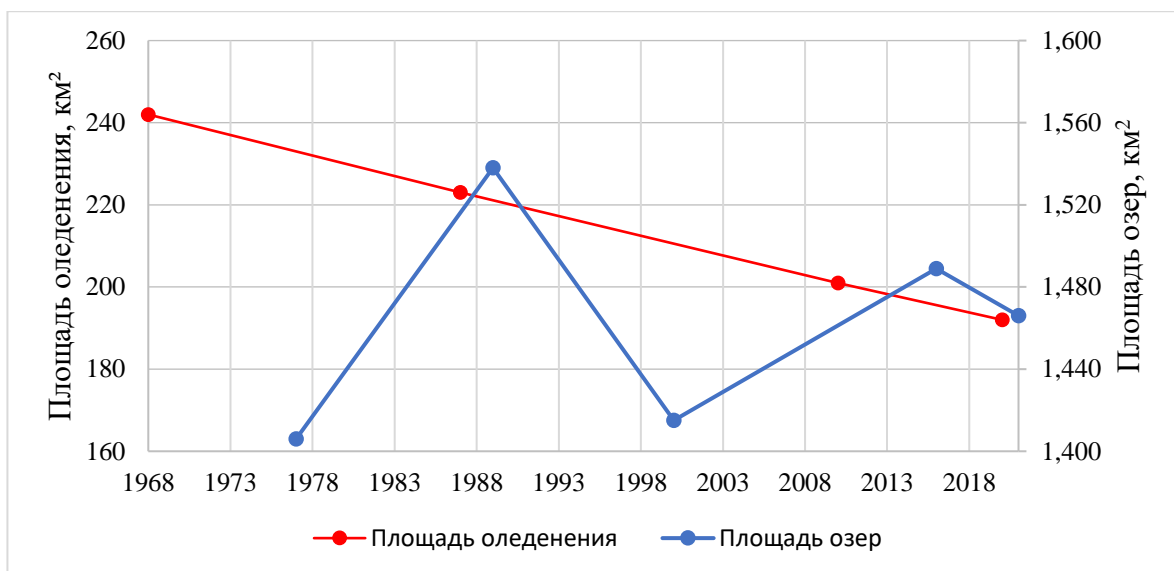


Рис. 18. Графики временной изменчивости площадей оледенения и площадей озер горного массива Таван-Богдо-Ола.

На исследуемой территории горного массива Таван-Богдо-Ола также отчетливо видно, что количество озёр увеличивается при уменьшении площади оледенения. Однако очевидной зависимости изменения суммарной площади озёр проследить не удастся. Причиной этого послужила сильная изменчивость размера самого крупного озера, временная изменчивость морфометрических характеристик которого была рассмотрена ранее.

За период с 1989 по 2000 год стало больше всего на 1 озеро, а рассмотренное ранее озеро получающее питание с крупнейшей системы

ледников массива Таван-Богдо-Ола, состоящей из ледника Потанина и Александры, уменьшилось на 9,6% (0,147 км²) от суммарной площади всех озёр на 1989 год.

5.2 Распределение озёр по морфологическому типу связанного с ними ледника

На территории горного массива Монгун-Тайга коэффициент озёрности составил 0,26%. Озёра расположены неравномерно на территории массива, преимущественно на юго-западной части горного массива. Наибольшее количество озёр относится к каровым ледникам.

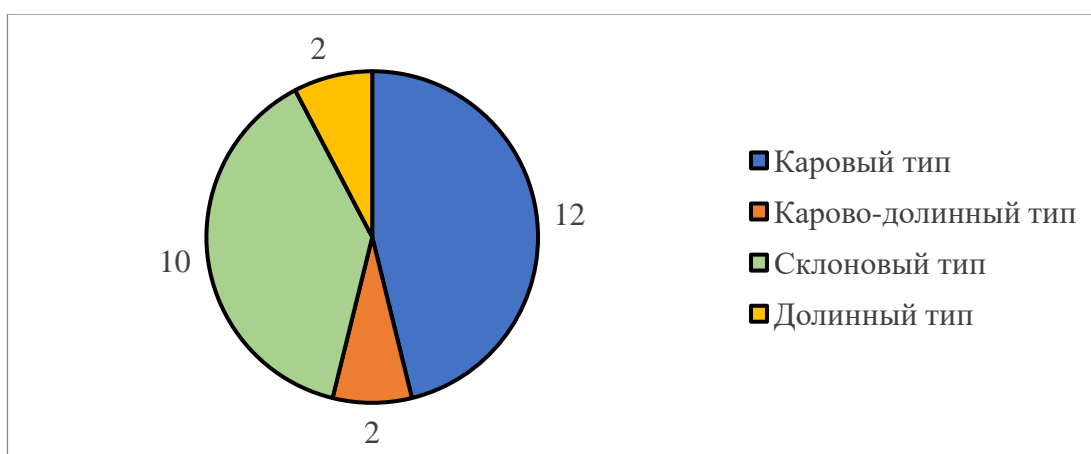


Рис. 19. Диаграмма распределения озёр по морфологическому типу связанного с ними ледника на территории массива Монгун-Тайга.

В 2019 году из 26 озёр массива 12 относятся к каровым ледникам, 10 озёр получают питание со склоновых ледников, всего 2 озера располагаются около языков карово-долинных ледников и 2 озера относятся к леднику Селиверстова являющимся долинным.

На территории горного массива Таван-Богдо-Ола коэффициент озёрности составил 0,22%. Озёра расположены неравномерно на территории массива, преимущественно на южных склонах. Наибольшее количество озёр относится также к каровым ледникам.

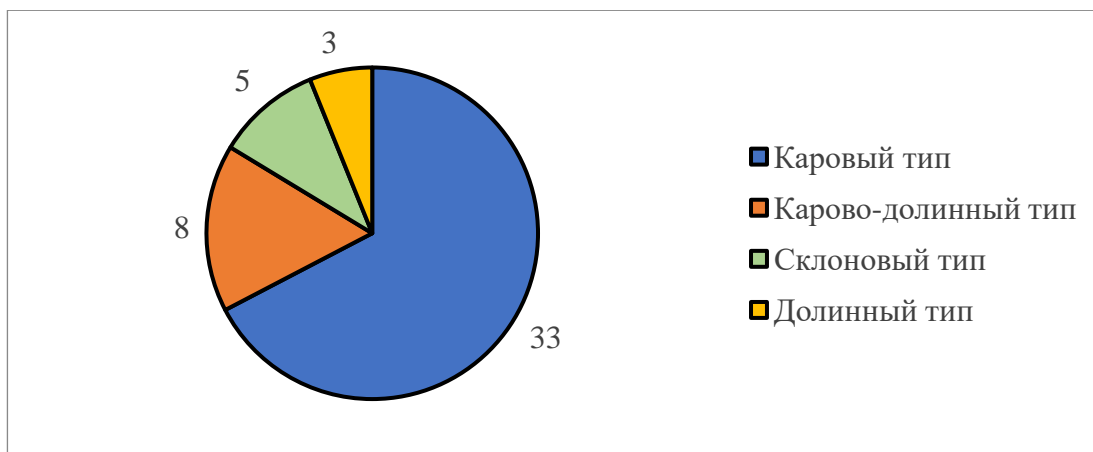


Рис. 20. Диаграмма распределения озёр по морфологическому типу связанного с ними ледника на территории массива Таван-Богдо-Ола.

В 2021 году на территории горного массива Таван-Богдо-Ола находилось 49 перигляциальных озёр. 33 из них питаются талыми водами каровых ледников, ещё 8 относятся к карово-долинным типам ледников, 5 к склоновым и 3 расположились около языков системы ледников Потанина и Александры, относящихся к долинному типу.

Количество озёр, получающих питание с каровых типов ледников наибольшее на территории двух исследуемых горных массивах. Это объясняется морфологией ледников этих типов. Каровые ледники расположены в карах – чашеобразных углублениях на горном склоне, часто с отвесными стенками. Дно каров пологое, вогнутое. В этих углублениях и располагаются каровые ледники. В процессе отступления ледника, в освободившейся от льда отрицательной форме рельефа образуется перигляциальное озеро.

Наименьшее количество ледников относится к долинному типу. Однако ввиду огромных размеров таких ледников, озёра, образованные в результате таяния этих типов ледников, как правило большие по площади поверхности и отличаются наибольшей временной изменчивостью морфометрических характеристик.

Значения коэффициента озёрности исследуемых массивов близки друг к другу, что говорит о схожести гидрологических условий. Значения ниже более чем в 2 раза по сравнению со значением коэффициента озёрности Республики Алтай, которое составляет 0,59% [14]. Так как большую площадь территории

занимают ледники, то значения получились ниже коэффициента озёрности Республики Алтай.

5.3 Высотное распределение перигляциальных озёр

Визуально сравнив снимки массивов разных лет отчетливо видно, как быстро сокращаются площади оледенения на территории двух горных массивах. В результате исследования было установлено, что абсолютное большинство новых озёр появляется именно в местах, где 10-20 лет назад находился ледник.

Таблица 3. Распределение количества озёр и суммарных площадей по высотным интервалам на территории массива Монгун-Тайга

Высотный интервал, м	Количество озёр/суммарная площадь озёр, км ²				
	1977	1989	2001	2015	2019
3100-3200	-	-	3/0,012	4/0,011	2/0,016
3000-3100	-	1/0,024	1/0,029	3/0,028	1/0,025
2900-3000	3/0,039	2/0,023	4/0,086	10/0,130	7/0,097
2800-2900	2/0,076	3/0,099	6/0,134	6/0,151	5/0,132
2700-2800	4/0,123	5/0,145	6/0,167	7/0,174	6/0,152
2600-2700	1/0,053	2/0,089	2/0,096	2/0,110	2/0,097
2497-2600	2/0,066	3/0,097	3/0,091	3/0,097	3/0,086

Таблица 4. Распределение средних площадей озёр по высотным интервалам на территории массива Монгун-Тайга

Высотный интервал, м	Средняя площадь озёр, км ²				
	1977	1989	2001	2015	2019
3100-3200	-	-	0,004	0,003	0,008
3000-3100	-	0,024	0,029	0,009	0,025
2900-3000	0,013	0,012	0,022	0,013	0,014
2800-2900	0,038	0,033	0,022	0,025	0,026
2700-2800	0,031	0,029	0,028	0,025	0,025
2600-2700	0,053	0,045	0,048	0,055	0,049
2497-2600	0,033	0,032	0,030	0,032	0,029

Высотный интервал 2497 – 2600 м и 2600 – 2700 м: нижние высотные интервалы подвержены наименьшим изменениям как количества, так и суммарной площади озёр, средние площади озёр тоже практически не изменяются, поскольку озёра находятся далеко от края ледника, соответственно и менее зависят от его морфологических изменений. Озёра становятся стабильнее, и доля питания талыми водами постепенно сокращается, увеличивается доля питания поверхностным стоком, атмосферными осадками и подземными водами. Предположительно такие озёра будут существовать значительно дольше, чем те, что находятся в верхних высотных интервалах.

Высотный интервал 2700 – 2800 м и 2800 – 2900 м: в средних высотных интервалах ситуация отличается, ледники оказывают сильное влияние на эти озёра. По мере отступления ледников появляются новые озёра, как правило относительно небольшие по размерам, поэтому значение суммарной площади озёр растёт не пропорционально количеству, а средняя площадь озёр постепенно уменьшается. Особенно заметны изменения, произошедшие с 1989 года по 2001 год, количество озёр в высотном интервале 2800-2900 м выросло в 2 раза, появилось 3 новых озера, среднее значение площадей озёр за этот период уменьшилось с 0,033 км² до 0,022 км².

Высотный интервал 2900 – 3000, 3000 – 3100 и 3100 – 3200 м: верхние высотные интервалы подвержены максимальным изменениям, озёра, расположенные в этих интервалах, подвержены огромному влиянию ледников, поскольку находятся максимально близко к ним, а значит отличаются наименьшей стабильностью из всех. В 1977 году в высотных интервалах 3000 – 3100 и 3100 – 3200 м озёр не было вовсе, как и в 1989 году в интервале 3100 – 3200 м, а в 2015 году суммарно в этих двух интервалах располагалось уже 7 озёр. Именно в верхних высотных интервалах появляется больше всего озёр, как правило, эти озёра самые маленькие из всех, это видно из таблицы средних площадей озёр. Большинство таких озёр относительно быстро исчезают, а их маленький размер и сильная степень зависимости от абляции ледника способствует этому.

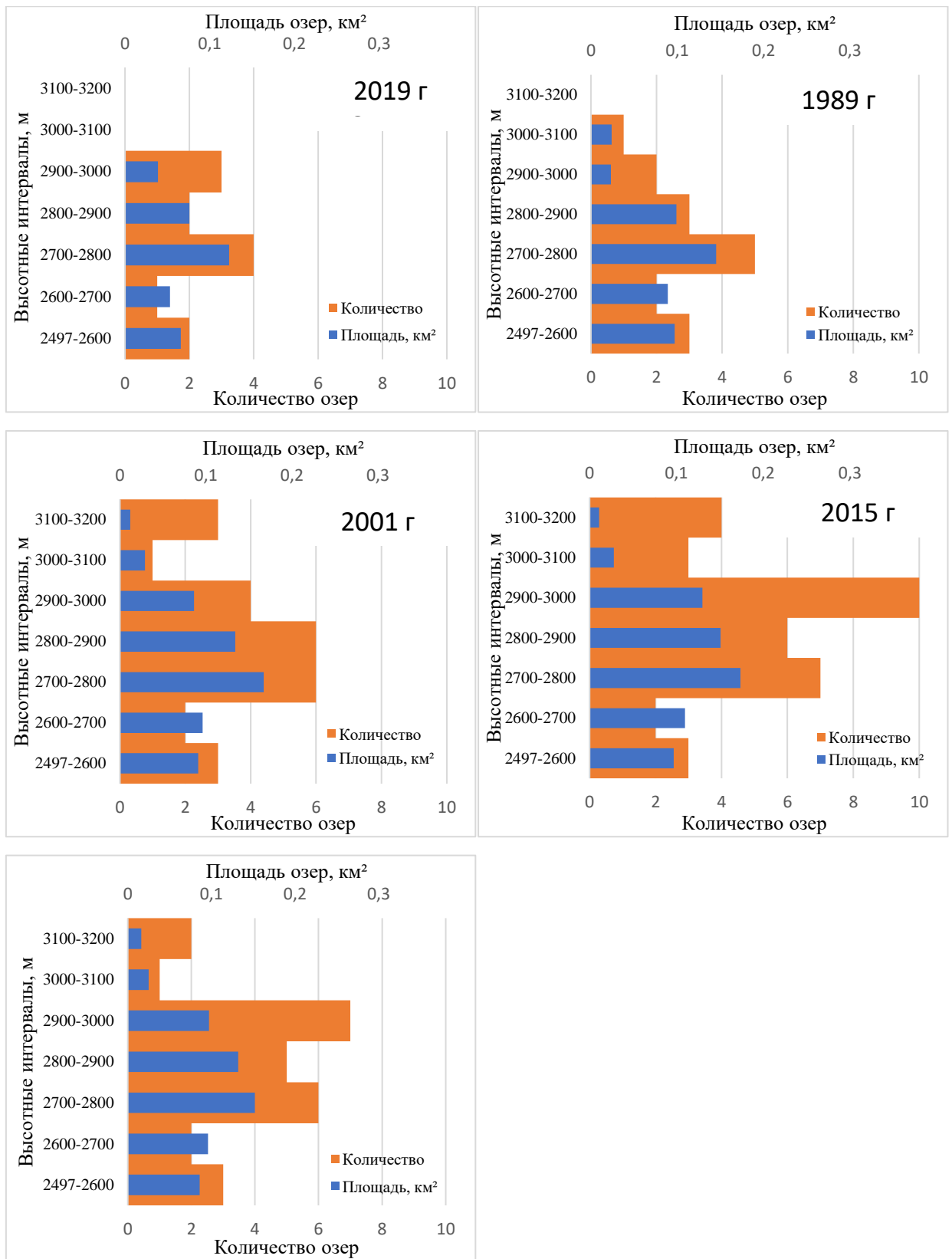


Рис. 21. Диаграммы высотного распределения и количества перигляциальных озёр на горном массиве Монгун-Тайга.

Диаграммы высотного распределения площадей и количества перигляциальных озёр в исследуемый период наглядно демонстрируют активный рост значений площадей и количества озёр в верхних высотных интервалах и замедление темпов роста значений в средних высотных интервалах. Это происходит по той причине, что при отступании ледников вверх по склону, на новых моренных отложениях формируются новые небольшие озёра, а по мере отдаления ледника от озера, последние получают меньше питания и уменьшаются в размерах.

На территории горного массива Монгун-Тайга наибольшее количество озёр расположено в высотном интервале 2700-3000м. Наиболее показательными являются самые высокие интервалы от 2900 м до 3200 м. Так, например, в этом диапазоне в 1977 году было всего 3 озера, а в 2015 уже 17.

Отдельно стоит обратить внимание на период с 2015 по 2019 года, за этот период суммарная площадь озёр начала уменьшаться в каждом высотном интервале, кроме самого верхнего, а количество озёр в этот период уменьшилось в высотных интервалах от 2700 до 3200 м, а в интервале 2497-2700 осталось неизменным. Смена тенденции увеличения количества перигляциальных озёр и их суммарных площадей на тенденцию уменьшения этих значений может говорить о наступлении нового этапа – деградации перигляциальных озёр в условиях таяния ледникового покрова. Происходит это по причине того, что более старые озёра находящиеся в средних и нижних высотных интервалах из-за увеличения расстояния до ледника получают все меньше питания, а питания поверхностным стоком, атмосферными осадками и подземными водами недостаточно для поддержания столько больших объемов. В свою очередь в верхних высотных интервалах хоть новые озёра и продолжают образовываться, но в силу их небольшого объёма и меньшего количества, чем ранее, суммарные площади начинают уменьшаться.

Таблица 5. Распределение количества озёр и суммарных площадей по высотным интервалам на территории массива Таван-Богдо-Ола

Высотный интервал, м	Количество озёр/суммарная площадь озёр, км ²				
	1977	1989	2000	2016	2021
3100-3200	-	-	1/0,005	1/0,005	1/0,006
3000-3100	2/0,034	6/0,080	7/0,092	12/0,143	13/0,146
2900-3000	8/0,404	12/0,325	12/0,328	15/0,392	16/0,396
2800-2900	9/0,620	14/0,863	15/0,744	15/0,673	16/0,667
2700-2800	3/0,258	4/0,216	2/0,192	3/0,192	2/0,186
2600-2700	1/0,090	1/0,054	1/0,054	1/0,084	1/0,065

Таблица 6. Распределение средних площадей озёр по высотным интервалам на территории массива Таван-Богдо-Ола

Высотный интервал, м	Средняя площадь озёр, км ²				
	1977	1989	2000	2016	2021
3100-3200	-	-	0,005	0,005	0,006
3000-3100	0,017	0,013	0,013	0,012	0,011
2900-3000	0,051	0,027	0,027	0,026	0,025
2800-2900	0,069	0,062	0,050	0,045	0,042
2700-2800	0,086	0,054	0,096	0,064	0,093
2600-2700	0,090	0,054	0,054	0,084	0,065

Высотный интервал 2600 – 2700 м и 2700 – 2800 м: озёра, расположенные в нижних высотных интервалах, так же, как и на территории горного массива Монгун-Тайга подвержены гораздо меньшему изменению. В этих интервалах располагается небольшое количество больших по размерам озёр. Однако, изменения как в количестве озёр, так и в площадях зеркал присутствуют. Так, например единственное озеро в интервале 2600 – 2700 м сначала уменьшилось, затем увеличилось в период с 2000 по 2016 год, а к 2021 снова уменьшилось. А

в высотном интервале 2700 – 2800 м прослеживается постепенное уменьшение суммарных площадей озёр.

Высотный интервал 2800 – 2900 м и 2900 – 3000 м: в средних высотных интервалах количество озёр постоянно увеличивается, однако суммарные площади изменяются в рассматриваемый период, то увеличиваясь, то уменьшаясь, но в конечном итоге значения 2021 года очень близки к значениям 1977 года. Проанализировав значения средних площадей озёр, которые постоянно уменьшаются, можно сделать вывод, что в этом высотном интервале появляются новые перигляциальные озёра малой площади, а старые в среднем уменьшаются в размерах. В отличие от ситуации на массиве Монгун-Тайга, где озёра распределены почти в равных долях между высоким и средним высотным интервалом, на территории массива Таван-Богдо-Ола в среднем высотном интервале находится абсолютное большинство озёр.

Высотный интервал 3000 – 3100 и 3100 – 3200 м: В 1977 году в верхних интервалах было сформировано только 2 озера, к 1989 году 6, а в 2021 году насчитывалось уже 14 озёр. При этом в интервале 3100 – 3200 м появилось только 1 озеро в период с 1989 по 2000 года, не сильно изменяясь в размерах, оно так и осталось единственным в своем интервале. Новые озёра на высоте от 3000 до 3100 метров появлялись очень быстро, однако они имеют очень маленькие размеры, как и на территории массива Монгун-Тайга.

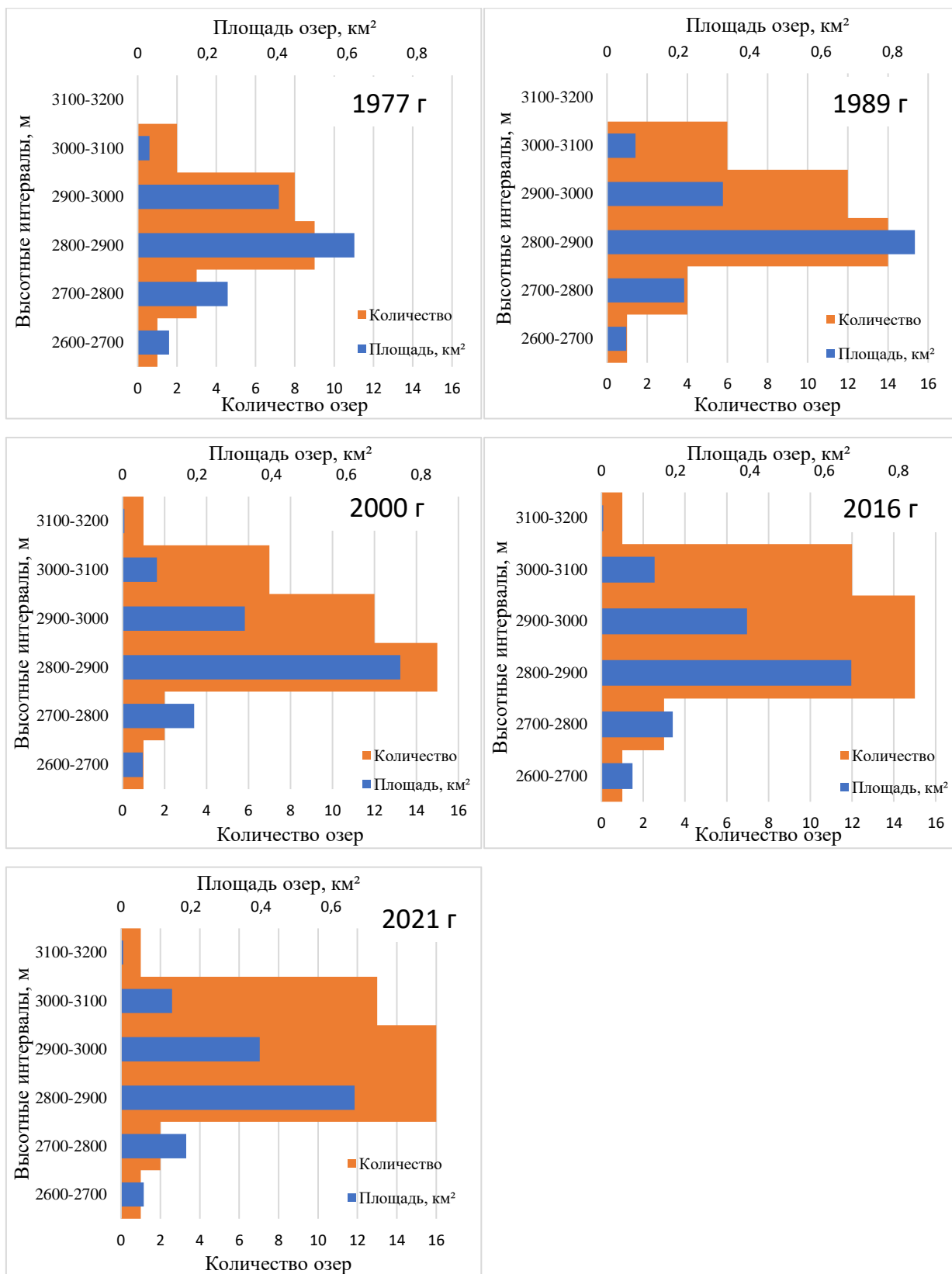


Рис. 22. Диаграммы высотного распределения и количества перигляциальных озёр на горном массиве Таван-Богдо-Ола.

Опять же наиболее показательным являются 3 наивысших высотных интервала от 2900 м до 3200 м. В 1977 году в этом интервале располагалось всего 10 озёр, а в 2021 уже 30.

Общая тенденция появления новых, небольших по размеру, озёр в средних и верхних высотных интервалах и низкая изменчивость в нижних интервалах прослеживается на примере двух исследуемых массивов. Однако, очевидная тенденция изменения суммарных площадей озёр на территории горного массива Таван-Богдо-Ола не прослеживается. Общей чертой двух массивов, помимо увеличения количества озёр, является уменьшение значения средних площадей озёр в средних и верхних высотных интервалах, это говорит о том, что на исследуемой территории в исследуемый период создавались благоприятные условия для формирования новых озёр малой площади. В отличие от массива Монгун-Тайга, тенденция последнего года уменьшения количества и суммарных площадей озёр на территории массива Таван-Богдо-Ола так явно не прослеживается, однако темпы роста количества озёр заметно снизились, а суммарная площадь, хоть немного, но все же уменьшилась в нижних высотных интервалах, а в верхних увеличилась совсем немного.

Выбранные для отдельного анализа перигляциальные озера наглядно отображают происходящую ситуацию на обоих горных массивах. Отчетливо прослеживается тенденция появления новых озёр, которые быстро вырастают в размерах, достигая максимальной площади зеркала за счёт поступления большого количества талых вод с ледников. Затем наступает стадия регрессии озера, его площадь поверхности начинает постепенно уменьшаться по мере удаления края ледника от озера, поскольку количество воды, попадающее в котловину озера уменьшается. С течением времени многие озера перестают свое существование вовсе, либо в результате постепенного истощения, либо в результате прорыва моренной плотины, в этом случае это катастрофическое явление представляет собой большую угрозу. В это время в верхних высотных интервалах могут образовываться новые озёра, самых различных форм и

размеров, но как правило небольшие по размеру. Разумеется, существуют и озёра, которые не перестают свое существование долгие годы.

На протяжении исследуемого периода тенденция увеличения количества и суммарных площадей, а также уменьшения средних площадей озёр четко прослеживалась, однако ближе к настоящему времени темпы роста начинали уменьшаться, а на территории горного массива Монгун-Тайга и вовсе тенденция стала обратной. Разумеется, данных одного года недостаточно для утверждения того, что и в будущем количество озёр будет сокращаться, а суммарная площадь зеркал уменьшаться, ведь как показывает пример массива Таван-Богдо-Ола бывают различные, частные ситуации способные оказать влияние на полученные данные со всего массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были решены следующие задачи:

По литературным данным изучены причины и механизмы прорывов перигляциальных озёр представляющие собой большую потенциальную угрозу для человека и его деятельности. Рассмотренные природные явления и факторы являются причинами наводнений, вызванных прорывами приледниковых озёр.

Произведенный обзор литературы по теме работы, позволили сделать вывод о недостаточной изученности перигляциальных озёр горных массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола.

Благодаря современным технологиям удалось изучить временную изменчивость площадей приледниковых озёр за рассмотренный период. Совершенствование аппаратуры спутников позволило повышать качество изображений, тем самым увеличивая точность определения границ исследуемых объектов и получать достоверные и более точные данные.

Выявлены и описаны основные тенденции развития перигляциальных озёр в исследуемом регионе:

1. В условиях деградации нивально-гляциального комплекса, наблюдается активное образование новых озёр в средних и верхних высотных интервалах, заполняющих образованные котловины моренного происхождения, в результате отступления краёв ледников, талыми водами. Установлено, что преобладают озёра, связанные с каровыми ледниками.

2. Рост суммарных площадей перигляциальных озёр на исследуемой территории массива Монгун-Тайга с 1977 г до 2015 г и до 2016 г на территории массива Таван-Богдо-Ола, ожидаемый в результате образования новых озёр.

3. Явная тенденция уменьшения средних размеров озёр, особенно в средних и верхних высотных интервалах. Это происходит в следствии постепенного уменьшения площадей поверхности отдельных озёр, образованных ранее, а также из-за появления новых озёр небольшого размера.

4. Выявлена тенденция уменьшения количества озёр и площадей после 2015 года на территории горного массива Монгун-Тайга, и снижение темпов

появления новых озёр на территории горного массива Таван-Богдо-Ола после 2016 года при небольшом уменьшении суммарной площади зеркал озёр. На основе этой тенденции выдвинуто предположение об изменении стадии развития озёр. Предполагается, что в новой стадии количество озёр продолжит сокращаться, а суммарная площадь поверхности уменьшаться. Однако, это предположение требует дальнейшего изучения, наблюдений и мониторинга ситуации, поскольку является очень важной как с научной точки зрения, так и с практической.

Анализ озёр, получающих питание с крупных ледников массивов и озёр, связанных с каровыми ледниками, наглядно показал происходящую ситуацию на исследуемой территории. При отступании ледников площадь озера сначала увеличивается, а затем, по мере дальнейшего удаления края ледника от озера, его площадь начинает уменьшаться, что и подтверждает выдвинутое предположение об предполагаемой в будущем тенденции к уменьшению площадей перигляциальных озёр.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов, В.В. (2005). Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования и в гидравлике открытых потоков. Дис. ... д-ра техн. наук.
2. Боронина А.С., Четверова А.А., Попов С.В., Пряхина Г.В. (2019). Обзор потенциально прорывоопасных озер и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида). В: Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России, материалы II Всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 5–7 июня 2019 г. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 307–318.
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. «ОПИСАНИЕ МАССИВА ДАННЫХ МЕСЯЧНЫХ СУММ ОСАДКОВ НА СТАНЦИЯХ РОССИИ». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394
4. Виноградов Ю.Б. (1976). Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера. Селевые потоки, 1, 138–153.
5. Виноградов Ю.Б. (1977). Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеиздат
6. Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Динамика многолетних снежников и снежно-фирновых полей массива Монгун-Тайга // Вестн. СПбГУ. 2012. Сер..7. Вып..4. С..163–174.
7. Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Особенности динамики многолетних снежников массива Монгун-Тайга в 1966–2011 гг. // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 43–51.
8. Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В. и др. Современное оледенение хребта Цамбагарав (Северо-Западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода // Лед и снег, 2016, т. 56, № 4, с. 437–452.
9. Ганюшкин Д. А., Чистяков К. В. Горные геосистемы внутриконтинентальных регионов Азии – структура и современная динамика //

Вопросы географии. Исследования гор. Горные регионы Северной Евразии. Развитие в условиях глобальных изменений. — Т. 137. — Издательский дом Кодекс Москва, 2014. — С. 83–106.

10. Докукин М.Д. Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам дистанционного зондирования Земли // Сб. трудов Северо-Кавказского ин-та по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Т. 20. Пятигорск: «Севкавгипроводхоз», 2014. С. 82–97.

11. Докукин М.Д., Хаткутов А.В. (2016). Озера у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы. Лед и Снег, 56 (4), 472–479. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479>

12. Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озёр с подземными каналами стока (анализ современной аэрокосмической информации) // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 47–56.

13. Донченко Е.Д. Оледенение Шапшальского хребта и его динамика в историческое время (по материалам аэрофотосъемки) // Гляциология Алтая. — 1962.

14. Измайлова А. В., Корнеенкова Н. Ю. ОЗЕРНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЕ ФАКТОРЫ // ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ. — 2020. — том 47, № 1, С. 16–25

15. Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н. и др. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск, 2018, т. XII, № 2, с. 38–46.

16. Михайлов Н.И. Орография Саяно-Алтайской горной системы // Победенные вершины год 1954. Ежегодник советского альпинизма. — С. 183–212.

17. Мочалов В.П., Цукерман И.Г. (1982). Методы расчета гидрографов паводков при прорыве горных озер. Селевые потоки, 6, 34–50.

18. Мухаметов Р.М. Колебание ледниковых систем Алтае-Саянской горной страны: Автореф. ... канд. дисс. — Иркутск, 1988.

19. Нуркадилов З.К., Хегай А.Ю., Попов Н.В. (1986). Искусственное опорожнение прорывоопасного озера у подножья пульсирующего ледника. Материалы гляциологических исследований, 58, 108–110.
20. Попов Н.В. (1987). Прорывные гляциальные сели и борьба с ними в горах Северного Тянь-Шаня. Материалы гляциологических исследований, 59, 188–193.
21. Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С. (2019). Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов. Криосфера Земли, 23 (3), 25–32. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(25-32\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(25-32))
22. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Распутина В.А., Войнаровский А.Е. (2019). Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема. Изв. РГО, 151 (2), 51–63. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>
23. Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутина В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатова А.Р., Непоп Р.К. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 4. С. 26–35. doi: 10.15372/KZ20210403.
24. Распутина В. А., Ганюшкин Д. А., Банцев Д. В., Пряхина Г. В., Вуглинский В. С., Свирепов С. С., Панютин Н. А., Волкова Д. Д., Николаев М. Р., Сыроежко Е. В. (2021). Оценка прорывоопасности малоизученных озёр массива Монгун-Тайга. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 66(3), 487-509. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.304>
25. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 316 с
26. Селиверстов Ю.П., Москаленко И.Г., Новиков С.А. Современное оледенение массива Монгун-Тайга (Внутренняя Азия) и ороклиматические условия его существования // МГИ. 1997. Вып. 82. С. 33-42.
27. Селиверстов Ю.П. Современное оледенение Монгун-Тайги (юго-запад Тувы) // Изв. ВГО. – Т. 104. – Вып. 1. – 1972. – С. 40-44.

28. Селиверстов Ю.П., Чистяков К.В., Москаленко И.Г. Оледенение северного склона массива Таван-Богдо-Ола и его динамика // Изв. РГО. 2003. Т.135, вып. 5. С. 1-16
29. Сапожников В.В. По Русскому и Монгольскому Алтаю. М.: Географгиз, 1949. 580 с.
30. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. (2018). Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 г. Криосфера Земли, 22 (2), 70–80. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80))
31. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбеева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли, 2007а, т. XI, № 1, с. 72–84.
32. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. (2007). Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. Материалы гляциологических исследований, 102, 225–229.
33. Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Алейников А.А. (2003). Новые селеопасные озера у края ледника Башкара на Центральном Кавказе. Материалы гляциологических исследований, 95, 153–160
34. Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Курочкин Ю.Н. Современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола. // Лёд и Снег. 2015. № 1 (129). С. 49–60.
35. Чистяков, К.В., Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Зелепукина Е.С., Амосов М.И., Волков И.В., Глебова А.Г., Гузель Н.И., Журавлев С.А., Прудникова Т.Н., Пряхина Г.В. Горный массив Монгун-Тайга. СПб.: Арт-Экспресс, 2012. 310 с.

36. Awal, R., Nakagawa, H., Fujita, M., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H. (2010): Experimental study on glacial lake outburst floods due to waves overtopping and erosion of moraine dam. *Annals of Disaster Prevention Research Institute* 53, 583–594.
37. Awal R., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y., & Zhang H. (2011). Study on moraine dam failure and resulting flood/debris flow hydrograph due to waves overtopping and erosion. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 3–12.
38. Bajracharya, S. R., Mool, P. K., Shrestha, B. R. (2007): The impact of global warming on the glaciers of the Himalaya. In: *International Symposium on Geo-disasters, Infrastructure Management and Protection of World Heritage Sites 25–26 Nov 2006*. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 231–242.
39. Björnsson H. (1976). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull*, 26, 1–15
40. Breien, H., De Blasio, F. V., Elverhøi, A., Høeg, K. (2008): Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides* 5, 271–280
41. Cenderelli, D. A., Wohl, E. E. (2001): Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and “normal” climatic floods in the Mount Everest region, Nepal. *Geomorphology* 40, 57–90.
42. Clarke G.K.C. (2003). Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring-Hutter formulation. *Journal of Glaciology*, 49 (165), 299–313. <https://doi.org/10.3189/172756503781830728>
43. Clauge, J. J., Evans, S. G. (2000): A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews* 19, 1763–1783.
44. Costa J.E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado. eros.usgs.gov. (n. d.). Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. [online] Доступно на: <https://eros.usgs.gov/> [Дата доступа 04.08.2021].

45. Costa, J. E., Schuster, R. L. (1988): The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin* 100, 1054–1068.
46. Emmer A., Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas // *AUC Geographica*, 2013, vol. 48, No. 2, p. 5–15.
47. Grabs, W. E., Hanisch, J. (1993): Objectives and prevention methods for glacier lake outburst floods (GLOFs). In: *Snow and Glacier Hydrology (Proceedings of the Kathmandu Symposium, November 1992)*, Great Yarmouth (UK), 341–352.
48. Haeberli W. (1983). Frequency, characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, 85–90.
49. Huggel C., Haeberli W., Kaab A., Bieri D. and Richardson S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (6), 1068–1083.
50. Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W., Teyssere, P., Paul, F. (2002): Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 316–330.
51. Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Bardou, E., Girod, F. (2004): The effect of weathering on Alpine rock instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37, 95–103.
52. Janský, B., Šobr, M., Yerokhin, S. (2006): Typology of high mountain lakes of Kyrgyzstan with regard to the risk of their rupture. *Limnological Review* 6, 135–140.
53. Kattelman, R., Watanabe, T. (1997): Draining Himalayan glacial lakes before they burst. In: *Destructive Water: WaterCaused Natural Disasters, their Abatement and Control (Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996)*, 337–343.
54. Kershaw, J. A., Clauge, J. J., Evans, S. G. (2005): Geomorphic and sedimentological signature of a two-phase outburst flood from moraine-dammed Queen Bess Lake, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 1–25

55. Lliboutry, L., Morales, B. A., Pautre, A., Schneider, B. (1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of moranic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology* 18, 239–254.
56. Neupane R., Chen H., Cao C. Review of moraine dam failure mechanism // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1948–1966.
57. O'Connor, J. E., Hardison, J. H., Costa, J. E. (2001): Debris flows from failures of Neoglacial-age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson Wilderness areas, Oregon. Reston (Virginia): U. S. Geological Survey.
58. Reynolds J.M. (2003). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment. UK: Reynolds Geo-Sciences LTD.
59. Richardson S.D., Reynolds J.M. (2000): An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31–47.
60. Richardson S. D., Reynolds J. M. (2000): Degradation of ice-cored moraine dams: implications for hazard development. In: *Debris-Covered Glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000), 187–197.
61. Strasser, M., Schindler, C., Anselmetti, F. S. (2008): Late Pleistocene earthquake-triggered moraine dam failure and outburst of Lake Zurich, Switzerland. *Journal of Geophysical Research* 113, 1–16.
62. Yamada, T. (1998): Glacier Lake and its Outburst Flood in the Nepal Himalaya. Tokyo, Japanese Society of Snow and Ice.
63. USGS – United States Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Дата обращения 21.02.2022).